

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Trabajo de Fin de Grado

**AJUSTE DE UN MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR
MR MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

2015

Autor: D. Manuel Pacheco Martín
Tutora: Dña. María Jesús López Boada

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, gata y amigos (vosotros sabéis quién sois) que les he tenido conmigo para acabar tarde o a tiempo esta carrera con mi buena y mi mala cabeza.

A Berrueces de Campos por estar conmigo desde que he nacido.

A mi tutora de trabajo María Jesús porque sin ella nada de lo escrito a partir aquí hubiese sido posible.

ABSTRACT

This Bachelor Degree Project seeks to model a direct magneto-rheological damper aided by genetic algorithms.

The main function of the suspension system of a vehicle is to ensure that all tires are in contact with the pavement, that all vibrations created by the contact of the tires are absorbed and that the suspensions assures safety and comfort to the vehicle's passengers.

There are three different set ups for the suspension system of a vehicle, based in its control system. Passive suspension is designed to function at specific fixed conditions. Active suspension adds actuators in the suspension system, instead of the conventional elements, in order to produce a force for any given situation. The possible set up is semi-active suspension that addresses the problem related with the running costs of active suspension and presents an intermediate design between active and passive suspension.

The damper in a semi-active suspension is, according to the latest research lines, the magneto-rheological damper. These dampers have a magneto-rheological fluid inside, which contains a 40% of suspended ferromagnetic particles in a lubricant solution. These particles are able, when induced with an electric current, to polarize forming a magnetic structure that increases their hysteric resistance. With this magneto rheological phenomena the rigidity of the damper is able to vary at a reduce cost.

There are two types of models. The direct model, which will be studied in this bachelor project, aims to predict the magneto rheological damper force by feeding a known current to the damper. The inverse model, on the other hand, estimates the current that needs to be fed to apply a determined force.

This bachelor degree project implements a direct model to experimental magneto rheological data aided by Genetic Algorithms.

Contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 OBJETIVO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO	8
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	9
CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN	10
2.1 INTRODUCCIÓN	10
2.2 TIPOS DE SISTEMAS SUSPENSIÓN	11
2.2.1 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN PASIVOS.....	11
2.2.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN ACTIVOS.....	12
2.2.3 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN SEMIACTIVOS	13
CAPÍTULO 3 MATERIALES REOLÓGICOS.....	15
3.1 INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA	15
3.2 MATERIALES ACTIVOS	16
3.3 FLUIDOS MR	17
3.4 APLICACIONES DE LOS FLUIDOS MAGNETORREOLÓGICOS	19
3.4.1 MODO DE VÁLVULA	20
3.4.1.1 AMORTIGUACIÓN EN ASIENTOS DE VEHÍCULOS PESADOS	21
3.4.1.2 CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA PARA INGENIERIA CIVIL	22
3.4.1.3 AMORTIGUADORES MR EN SISTEMAS DE SUSPENSION DE VEHÍCULOS	23
3.4.2 MODO CIZALLADURA	25
3.4.3 MODO COMPRESIÓN	27
CAPÍTULO 4	28
MODELIZACIÓN DE AMORTIGUADORES MR	28
4.1 INTRUCCIÓN	28
4.2 MODELOS PARAMÉTRICOS	29
4.2.1 MODELOS DIFERENCIALES	30
4.2.1.1 MODELO DE BINGHAM	30
4.2.1.2 MODELO DE BOUC-WEN	32
4.2.1.3 MODELO DE N.M. KWOK.....	36
CAPÍTULO 5	41

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN ALGORITMOS GENÉTICOS	41
5.1 INTRODUCCIÓN	41
5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	42
5.2.1 CODIFICACIÓN	43
5.2.2 EXTENSIONES Y MODIFICACIONES AL ALGORITMO GENÉTICO	45
CAPÍTULO 6	51
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	51
6.1 CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS	51
6.2 IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS.....	52
6.3 AJUSTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS	53
CAPÍTULO 7	61
CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	61
7.1 CONCLUSIONES	61
8.3 TRABAJOS FUTUROS.....	63
Bibliografía.....	64
Índice de Figuras	67
Índice de tablas.....	70
ANEXO I.....	71
RESULTADOS DE N. M. KWOK.....	71
A.1 IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS DE N. M. KWOK	71
A.2 AJUSTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS.....	72

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde el nacimiento de la automoción se ha investigado en métodos que mejoren el confort y la seguridad del vehículo en marcha. El sistema de suspensión de un vehículo lleva a cabo las funciones de sostener el peso del vehículo, absorber las irregularidades del terreno y proporcionar la comodidad deseada a los pasajeros. Los amortiguadores son uno de los principales elementos en un sistema de suspensión, junto con los resortes o las barras estabilizadoras.

Los amortiguadores actúan como freno, en número y amplitud, a las oscilaciones generadas tras el paso del vehículo por irregularidades del terreno. La deformación del medio elástico transforma la energía mecánica en energía calorífica, calentándose así el interior del amortiguador. En la actualidad, por su coste, el tipo de amortiguador más utilizado es el de tipo hidráulico [1].

En la industria del automóvil una de las líneas de investigación es el uso de fluidos con propiedades reológicas, concretamente en amortiguadores basados en fluidos magneto reológicos (MR). La condición de especial interés sobre este tipo de amortiguadores es la cualidad de proporcionar una respuesta de suspensión variable de respuesta rápida. Esto se lleva a cabo a través de partículas ionizables que mediante el uso de una corriente eléctrica externa modifican la rigidez del amortiguador [3].

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objeto el modelar el comportamiento de un amortiguador MR mediante un modelo propuesto por N. M. Kwok. Para ello en primer lugar se realizan ensayos sobre dicho amortiguador para obtener sus curvas de fuerza. Posteriormente se aplica el modelo de N.M. Kwok, con la ayuda del uso de algoritmos genéticos para definir los coeficientes de dicho modelo.

1.2 OBJETIVO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el ajuste de un modelo directo de amortiguador MR a datos experimentales, tomados en el banco de ensayo. Dicho ajuste se realiza con métodos de optimización basados en los algoritmos genéticos.

Existen dos tipos de modelos de amortiguadores MR: el modelo directo y el modelo inverso. El modelo inverso trata de estimar una corriente con la que hay alimentar al amortiguador MR para producir una determinada fuerza deseada. El modelo directo trata de estimar una fuerza a través de una corriente proporcionada por el modelo. En este proyecto se va a estudiar un modelo directo.

En este modelo a través de una posición, una velocidad y una fuerza real conocida se va a intentar modelar el amortiguador MR a distintas corrientes mediante el uso de algoritmos genéticos con el programa MATLAB.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado está constituido por siete capítulos y un anexo, siendo el primer capítulo la presente introducción.

En el capítulo 2 “Sistemas de Suspensión” Se hace una breve introducción a los tipos de sistemas de suspensión de un vehículo.

El capítulo 3 “Materiales Reológicos” explica qué es la reología y sus aplicaciones más importantes, haciendo un énfasis en los fluidos MR.

El capítulo 4 “Modelos matemáticos de los amortiguadores MR” explica los tipos de modelos que se utilizan para simular el comportamiento de un amortiguador MR. Se hace un estudio más extenso en los tipos de modelos directos.

En el capítulo 5 “Algoritmos genéticos” se explica este método de optimización, que ha sido el que se ha usado en este trabajo de fin de grado.

El capítulo 6 “Resultados Experimentales” se explica cómo se han obtenido los resultados y se estudian.

El capítulo 7 “Conclusiones y futuros desarrollos” reúne todos los conocimientos obtenidos a través de este Trabajo de Fin de Grado y presenta futuras mejoras para dicho Trabajo de Fin de Grado.

El Anexo I “Resultados de N. M. Kwok” presenta los resultados que obtiene dicho investigador para el ajuste del comportamiento de un Amortiguador MR

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El sistema de suspensión de un vehículo tiene un papel determinante en el comportamiento dinámico de un vehículo. El sistema de suspensión es responsable de mantener en contacto con el pavimento las ruedas del vehículo, de sostener el peso del vehículo, de absorber las vibraciones y irregularidades del terreno y de proporcionar seguridad y confort a los pasajeros.

2.2 TIPOS DE SISTEMAS SUSPENSIÓN

Según el sistema de control usado los sistemas de suspensión se pueden clasificar en sistemas pasivos, activos o semiactivos.

2.2.1 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN PASIVOS

Los sistemas de suspensión pasivos son aquellos que delimitan su uso óptimo a unas condiciones de contorno específicas. Esto se debe a que estos sistemas de suspensión se componen de elementos pasivos, es decir, que no aportan energía al sistema. Si una peculiaridad del terreno implica un trabajo de la suspensión imprevisto por las condiciones del diseño una suspensión pasiva no es capaz de adaptarse a este. Las suspensiones pasivas debido a sus condiciones de funcionamiento son las más utilizadas en vehículos de medio y bajo coste. La figura 2.1 muestra un esquema de un sistema de suspensión pasiva [12].

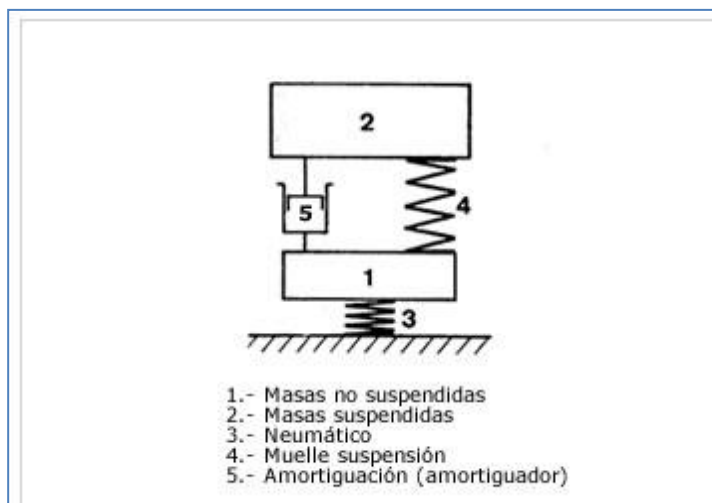


Figura 2. 1 Esquema de una suspensión pasiva en la rueda de un automóvil [12]

2.2.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN ACTIVOS

Los sistemas de suspensión activos requieren un sistema de control más complejo integrado en cada rueda del vehículo. Estos sistemas de control regula la rigidez para asegurar el máximo confort y seguridad ante factores como el estado de la calzada, la velocidad o el comportamiento de conducción [12]. El origen de la suspensión activa surge debido a necesidad de asegurar un sistema de suspensión fiable en un campo más amplio de situaciones; para ello esta asistido de ayuda electrónica vía sensores y actuadores eléctricos e hidráulicos. Un esquema de la distribución de una suspensión activa tipo se muestra en la figura 2.2.

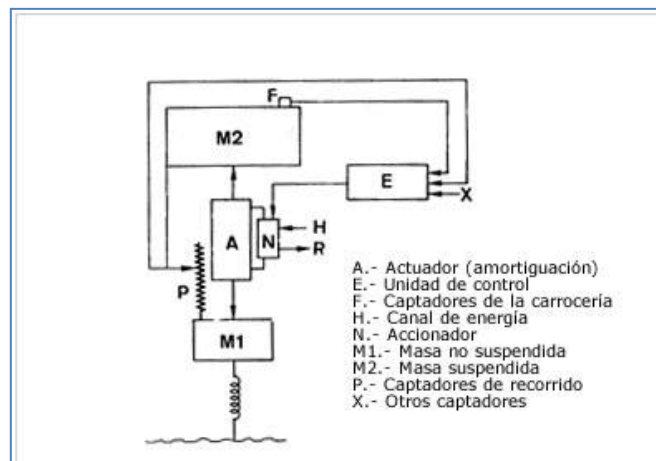


Figura 2. 2 Esquema de una suspensión activa en la rueda de un automóvil [12]

La gran desventaja de los sistemas de suspensión activos es su alto requerimiento energético para su óptimo funcionamiento.

2.2.3 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN SEMIACTIVOS

Los sistemas de suspensión semiactivos se comportan como un sistema de suspensión pasivo, con la salvedad de que contienen un controlador que cambia la rigidez de este, para conseguir mayor compromiso estabilidad-confort ante las situaciones del terreno.

Generalmente en los sistemas semiactivos el elemento de la suspensión que se regula es el amortiguador, figura 2.3. A través de una centralita se procesan datos obtenidos a través de varios sensores como giroscopios en puntos locales del automóvil, sensores de velocidad de giro del volante y sensores de velocidad del movimiento del amortiguador. Con la información obtenida la rigidez del amortiguador varía, a día de hoy, de forma casi inmediata para asegurar un compromiso de confort y seguridad.

Esta regulación de la amortiguación se hace de forma electrónica, de este modo el gasto energético de una suspensión semiactiva no requiere una fuente externa y por tanto es menor que el de la suspensión activa. En la siguiente figura se observa un esquema de una suspensión semiactiva en un automóvil.

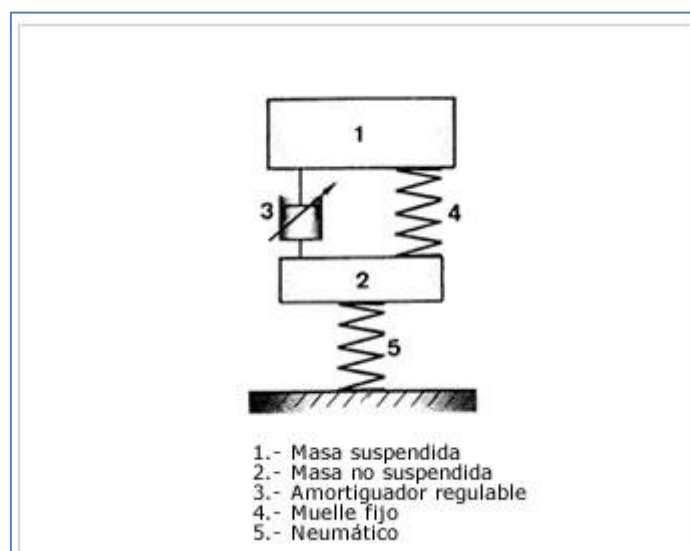


Figura 2. 3 Esquema de un sistema de suspensión semiactiva [12]

Durante el desarrollo de los sistemas semiactivos uno de los mayores inconvenientes era un tiempo de respuesta bajo y un gasto energético alto, debido a que los amortiguadores eran controlados por electroválvulas. Fue con la introducción de los fluidos MR en los amortiguadores y el desarrollo de los procesadores en las centralitas cuando se fue capaz de obtener una reducción de los tiempos de respuesta y el gasto energético.

CAPÍTULO 3

MATERIALES REOLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA

La reología es un término que definió Eugene Cook Bingham en 1929, para describir la rama de la física que tiene como objeto el estudio de la deformación o flujo de materia.

De este modo, un fluido reológico es el que cambia sus propiedades frente a una acción externa. El estímulo que hace cambiar las propiedades de dicho material puede ser debido a un cambio de temperatura, un esfuerzo mecánico, la aplicación de un voltaje o un campo magnético [3].

Los inicios de la reología se remontan a las teorías de los sólidos elásticos sometidos a pequeñas deformaciones, basados en la Ley de Hooke; para líquidos sencillos o gases basados en la Ley de Newton de la Viscosidad. La necesidad del estudio de la reología estuvo ligada al desarrollo de la industria de los polímeros.

3.2 MATERIALES ACTIVOS

Los materiales activos, también llamados “inteligentes” o materiales multifuncionales, poseen la característica de poder responder reversible y controladamente a los estímulos externos. Este tipo de estímulos pueden ser físicos, químicos, magneto-eléctricos, fotocromáticos o fotoactivos.

Los materiales activos pueden usarse bien como actuadores o como sensores.

Si el material activo es usado como un sensor, estos toman como señal de entrada fenómenos mecánicos, ya sean esfuerzos, cambios de temperatura o deformaciones. Estos en base al impulso externo generan señales que generalmente son un impulso eléctrico o magnético.

Recíprocamente, cuando el material activo tiene un uso de actuador, éste emite dicho esfuerzo mecánico en base a un impulso externo que puede ser de tipo eléctrico, magnético o térmico. En la figura 3.1, se explica el proceso de respuesta que sigue el material inteligente [5].

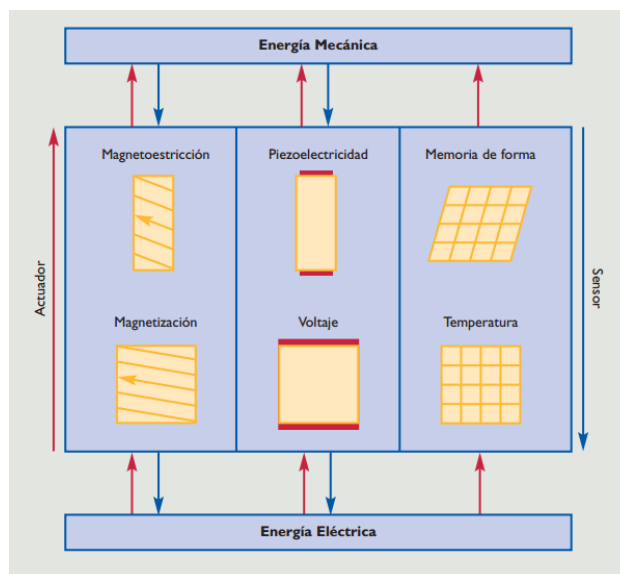


Figura 3. 1 Proceso de respuesta de Materiales Activos [5]

Según el tipo de respuesta del material activo, sobre el estímulo externo, se distinguen fundamentalmente tres tipos: materiales con memoria de forma, materiales electro-activos, magneto-activos, materiales foto-activos y cromo-activos. Las clases de materiales activos se observan en la tabla 3.1 [6].

MATERIALES ACTIVOS		
MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA <ul style="list-style-type: none"> • Aleaciones con memoria de forma • Polímeros con memoria de forma • Cerámicas con memoria de forma • Aleaciones con memoria de forma, ferromagnéticas 	MATERIALES ELECTRO Y MAGNETO ACTIVOS <ul style="list-style-type: none"> • Materiales electro y magnetoreológicos • Materiales piezoeléctricos • Materiales electro y magnetorestrictivos 	MATERIALES FOTO Y CROMOACTIVOS <ul style="list-style-type: none"> • Fotoactivos <ul style="list-style-type: none"> • Electroluminiscentes • Fluorescentes • Fosforescentes • Cromoactivos <ul style="list-style-type: none"> • Fotocrómicos • Termocrómicos • Electrocrómicos

Tabla 3. 1 Tipología de materiales activos [6].

3.3 FLUIDOS MR

Se denominan fluidos MR a los fluidos que están compuestos por partículas ferro-magnéticas que se encuentran dispersas en el líquido portador.

Dichas partículas poseen propiedades visco elásticas controlables mediante campos magnéticos externos. Los fluidos MR poseen cualidades de los nanomateriales, ya que se componen de una estructura microscópica diseñada específicamente para una función, y cualidades de los materiales inteligentes, debido a que mediante un estímulo externo una respuesta en el material es apercibida [4].

Las estructuras formadas por las partículas en suspensión del fluido MR forman una cadena, por interacción entre dipolos inducidos, que restringen la movilidad del fluido, mencionado fenómeno se observa en la figura 3.2. Consecuentemente durante este periodo el fluido MR aumenta su viscosidad

desarrollando una resistencia en suspensión. La propiedad que tienen este tipo de estructuras es que son directamente proporcionales a la magnitud del campo magnético inducido; por tanto cuanto mayor sea el campo magnético mayor esfuerzo mecánico será necesario para romper dichas estructuras [6].

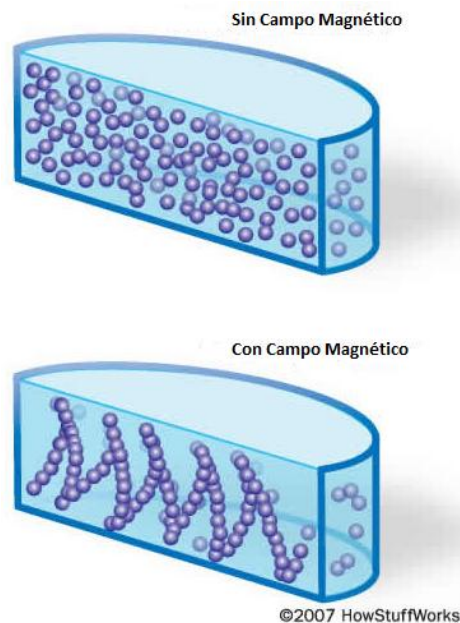


Figura 3. 2 Estructuras formadas en Fluido MR

El comportamiento de un fluido MR ante la ausencia de la inducción magnética es el de un fluido newtoniano. Esto implica que cuando el fluido en estas condiciones se encuentra ante una velocidad de deformación surge un esfuerzo proporcional viscoso en el fluido.

Si los esfuerzos son inferiores a la fluencia del fluido MR, este se comporta como un sólido visco elástico. Este comportamiento de los fluidos MR juega en ventaja sobre otro tipo de fluidos ya que para conseguir una mayor velocidad de deformación es necesario un esfuerzo superior, dicho esfuerzo en los fluidos MR es controlable induciendo un campo magnético. Este fenómeno significa que el esfuerzo de fluencia aumenta al aumentar el campo magnético y no la viscosidad del fluido, figura 3.3.

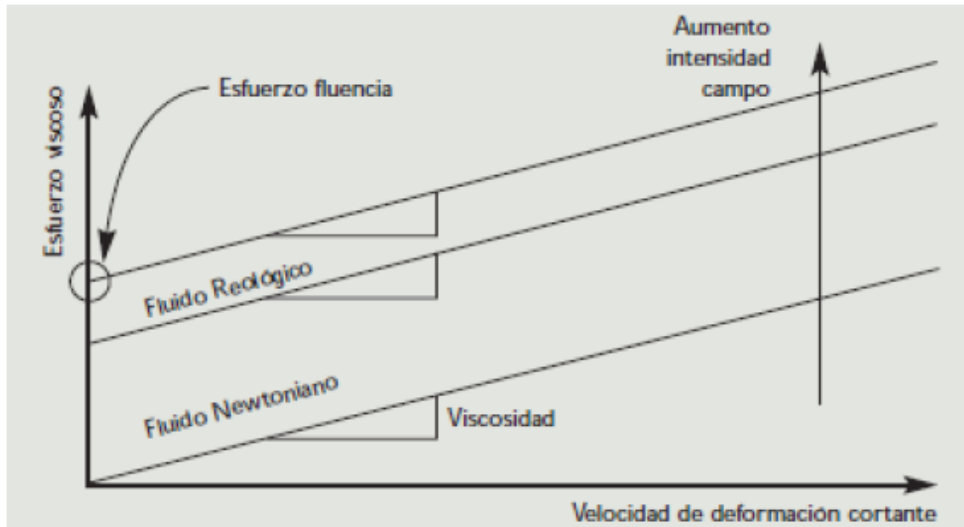


Figura 3. 3 Relación Esfuerzo viscoso ante intensidad de Campo Magnéticos

La composición de un fluido MR posee tres tipos de elementos que hacen posible la formación de la estructura magnética inducida.

- Partículas Magnéticas: Aleaciones de Hierro magnéticamente débiles. De un tamaño comprendido entre 1–10 μ m.
- Líquidos Portadores: A día de hoy se están utilizando aceites derivados del petróleo, aceites de silicona, aceites minerales, aceites sintéticos o agua.
- Agentes para la suspensión de las partículas: Agentes activos tixotrópicos como ácidos carboxílicos.

3.4 APLICACIONES DE LOS FLUIDOS MAGNETORREOLÓGICOS

Dependiendo del tipo flujo del fluido se pueden encontrar tres familias distintas en las aplicaciones de fluidos MR:

- Modo de Válvula
- Modo de Cizalladura
- Modo de Compresión

3.4.1 MODO DE VÁLVULA

En el modo válvula el fluido MR trabaja entre dos superficies fijas por las cuales se aplica un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo de fluido MR. Como se explica en el apartado 3.3, la resistividad del fluido es controlada por la intensidad del campo magnético que atraviesa el fluido [7]. En la figura 4 se ofrece una visión de cómo quedaría el modelo básico.

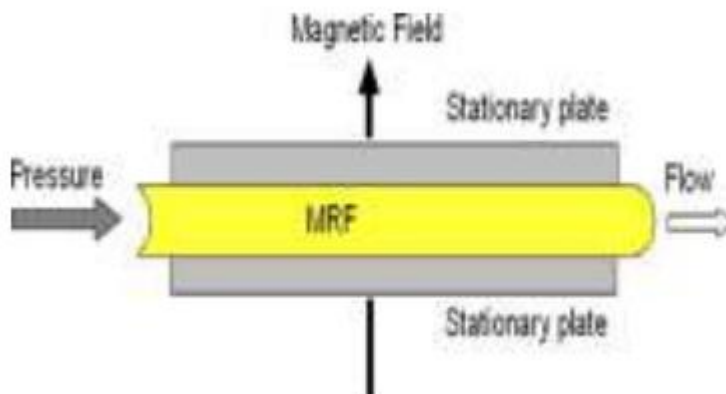


Figura 3. 4 Esquema flujo MR controlado por una válvula [7]

Las aplicaciones que tiene la disposición en modo válvula del fluido MR en la industria es el desarrollo de amortiguadores para sistemas de amortiguación ligados a la industria del automóvil. Una explicación más amplia sobre sistema de suspensión MR en el entorno del automóvil se muestra en el apartado 3.4.1.3.

3.4.1.1 AMORTIGUACIÓN EN ASIENTOS DE VEHÍCULOS PESADOS

En 1995 la empresa Lord, especializada en amortiguadores MR, comenzó el desarrollo de un sistema de suspensión basado en este tipo de modelos de fluidos MR para la amortiguación del asiento de conductor de vehículos pesados. El uso de estos sistemas MR para esta aplicación es debido a la capacidad del fluido MR de respuesta rápida. La función de un amortiguador MR en este tipo de asientos es ajustar en tiempo real una posición óptima para el conductor en función de su peso, los niveles de choque y las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno [3, 7, 8]. Las siguientes figuras 3.5 y 3.6 muestran unos esquemas del sistema de amortiguación de un asiento.

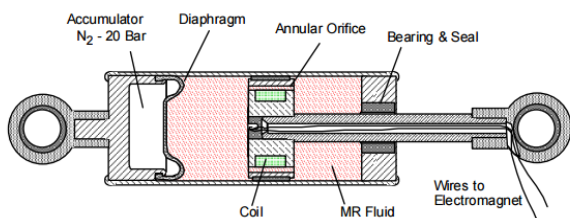


Figure 8. Commercial Linear MR Fluid-based Damper.

Figura 3. 6 Esquema de un amortiguador MR [7]

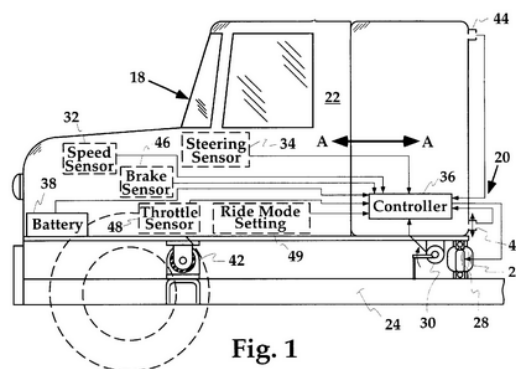


Fig. 1

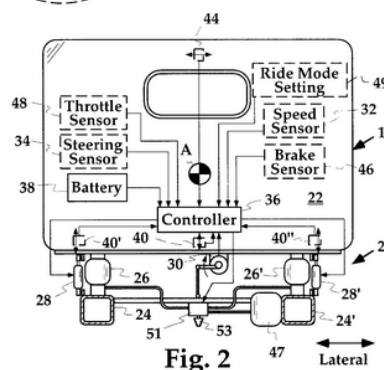


Fig. 2

Figura 3. 5 Esquema del sistema de amortiguación MR de un asiento de vehículo pesado [8]

3.4.1.2 CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA PARA INGENIERIA CIVIL

Un sistema de amortiguación a gran escala es usado en edificación como sistema de control de posibles vibraciones causadas por seísmos. Este tipo de sistemas se diseñan con una vida de funcionamiento infinita ya que durante años de funcionamiento el fluido MR puede no ser activado. Durante la etapa de funcionamiento el amortiguador MR suele estar diseñado para poder soportar magnitudes de hasta 20 toneladas durante un rango dinámico de diez toneladas. Este tipo de dispositivos se alejan de las dimensiones de los sistemas de amortiguación MR comunes debido a los esfuerzos que deben ser capaces de amortiguar. Como ejemplo de estas dimensiones el cableado de la bobina de inducción es de 1.5 kilómetros de largo y el amortiguador puede medir un metro, pesando 250 kilogramos [9]. Un esquema de este amortiguador se puede observar en la figura 3.7.

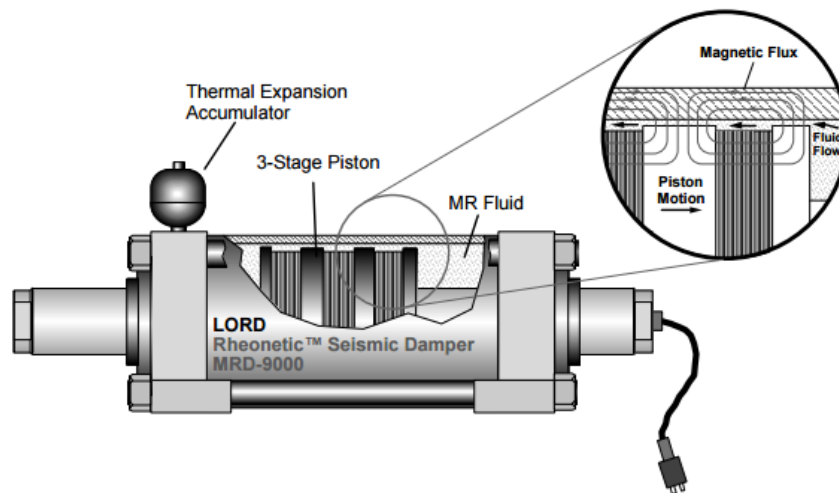


Figura 3. 7 Amortiguador para control vibraciones de seísmos [9]

3.4.1.3 AMORTIGUADORES MR EN SISTEMAS DE SUSPENSION DE VEHÍCULOS

La aplicación de fluidos MR en sistemas de amortiguación de la industria automovilística es en la actualidad una realidad entre los fabricantes del sector. La importancia de la aplicación de amortiguadores MR en el automóvil es debido a su capacidad de ofrecer confort y seguridad en marcha, al igual que otro sistema común de suspensión, además de poder ofrecer una respuesta rápida ante irregularidades del terreno. Una breve explicación de los tipos de suspensión según su sistema de control se ofrece en los siguientes apartados.

3.4.1.3.1 ESTRUCTURA DE UN AMORTIGUADOR MR

El amortiguador MR es, por el estado del fluido interior, de tipo hidráulico. El fluido absorbe las vibraciones transformando la energía mecánica en energía térmica. El fluido es regulado por una válvula que controla el paso de fluido a la cámara opuesta al movimiento causado por la vía. La figura 3.8 muestra un amortiguador MR.

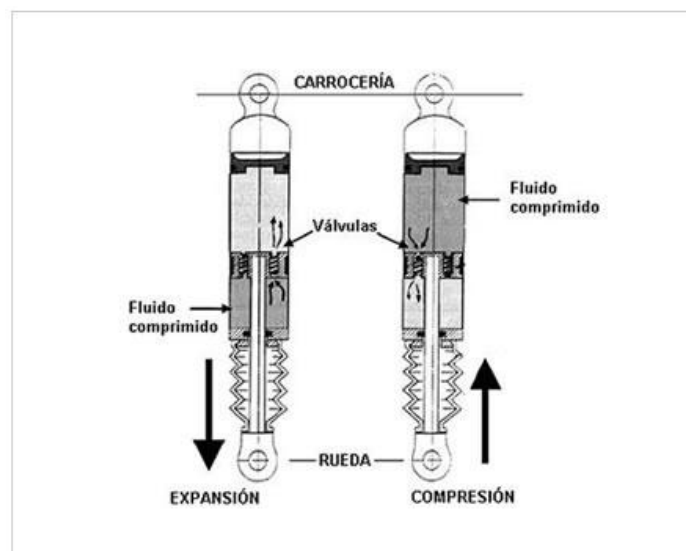


Figura 3. 8 Esquema funcionamiento de un amortiguador MR [12]

En los amortiguadores MR dicha válvula contiene una bobina por la que, si la situación lo requiere, circula corriente creando un campo magnético y por tanto, aumentando la viscosidad del fluido MR y la rigidez del amortiguador. En la figura 3.9 se puede observar la estructura de la válvula de un amortiguador MR.

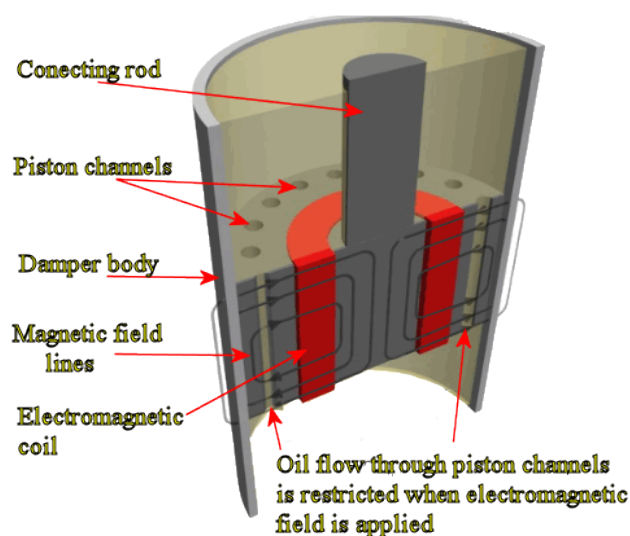


Figura 3. 9 Estructura de una válvula de un amortiguador MR
[13]

3.4.1.3.2 ESTADO DE LA INDUSTRIA AUTOMÓVIL EN AMORTIGUADORES MR

En la actualidad el uso de suspensiones semiactivas de tipo MR está desarrollado en amplios fabricantes que incluyen este tipo de disposición para sus productos de media alta gama.

El sistema MagneRide de Delphi Automotive fue la primera aplicación industrial de este tipo de sistemas de suspensión. En 2009 el grupo BeijingWest adquirió la división de Delphi Automotive encargada de la

producción de los sistemas de suspensión MR formando el grupo BWI. Las previsiones de producción del grupo BWI para el 2015 indican que 300,000 vehículos incorporarán el sistema MagneRide en ese año. Los principales grupos automovilísticos que incorporan la suspensión MagneRide en la actualidad son los siguientes:

- VW Group; en ciertos modelos de los fabricantes Audi, Lamborghini, Porsche, VW.
- General Motors; en ciertos modelos de Cadillac, Chevrolet.
- Tata Group; en ciertos modelos de Jaguar y Land Rover.
- Grupo Fiat; en ciertos modelos de Ferrari.

3.4.2 MODO CIZALLADURA

En el modo cizalladura el fluido MR fluye entre dos superficies rígidas que están en movimiento relativo entre ellas. La dirección del campo magnético inducido atraviesa las superficies perpendicularmente. En la figura 3.10 se muestra la mecánica de este tipo de disposición del fluido [10].

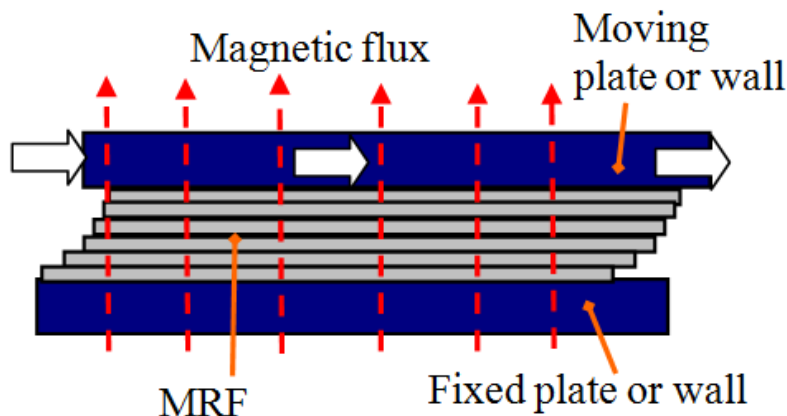


Figura 3. 10 Fluido MR bajo disposición de cizalladura [10]

Este tipo de modo es usado para embragues o frenos. Con esta disposición el fluido realiza una fuerza de frenado total causada por la viscosidad propia del fluido y la fuerza generada por campo magnético. El funcionamiento se basa en la restricción del movimiento de un sólido, habitualmente en rotación, a través del fluido MR que se encuentra rodeado por una superficie rígida que sostiene el sólido en movimiento. Un esquema de un freno MR podría ser el de la figura 3.11.

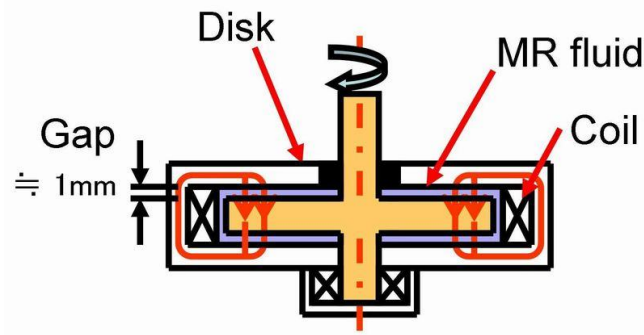


Figura 3. 11 Esquema de funcionamiento de un Freno MR [11]

Los frenos MR están siendo investigados para su uso en equipos de simulación virtual y para el uso de prótesis inteligentes [11]. En la figura 3.12 se puede observar un tipo de prótesis inteligente que utiliza un freno con fluido MR.

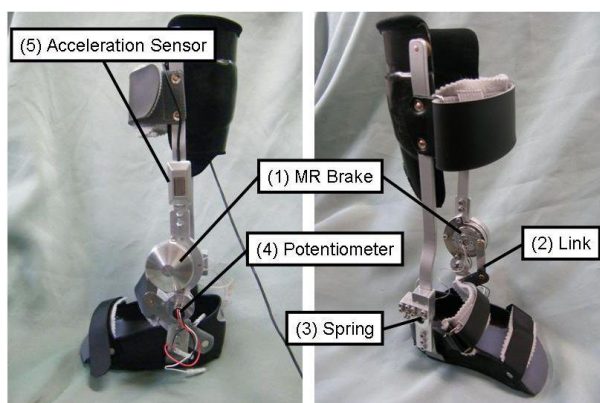


Figura 3. 12 Prótesis inteligente para orthosis en el talón [11]

3.4.3 MODO COMPRESIÓN

En el modo de compresión el fluido absorbe una fuerza externa que actúa en la misma dirección que el campo magnético inducido. Las superficies que sostienen el fluido MR se encuentran en movimiento relativo [7]. Un esquema de la distribución del fluido MR se muestra en la figura 3.13.

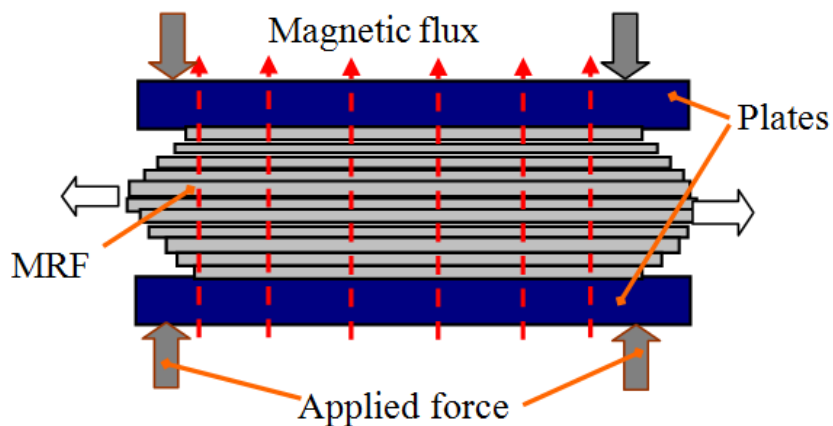


Figura 3. 13 Distribución de fluido MR a modo de compresión [9]

El uso del fluido MR en modo de compresión se encuentra en la actualidad en un estado del arte prematuro. Las líneas de investigación indican una gran utilidad del fluido MR para aplicaciones que requieran un desplazamiento de magnitud baja de un sólido rígido y una aplicación de fuerza de magnitud alta. Un ejemplo de este tipo de uso sería el modo de lubricación estática que requiere el uso de un compresor externo al circuito del fluido de lubricante.

CAPÍTULO 4

MODELIZACIÓN DE AMORTIGUADORES MR

4.1 INTRODUCCIÓN

La modelización de un amortiguador MR trata de poder expresar el comportamiento de estos dispositivos con ecuaciones o modelos matemáticos.

El estudio del comportamiento de un amortiguador MR está condicionado por las características no lineales del fluido. La rigidez del amortiguador depende de la magnitud de histéresis que proporciona el fluido para generar el cambio de viscosidad del fluido. Este cambio se produce cuando la velocidad del amortiguador varía [14].

Existen dos tipos de modelos de amortiguadores. Los modelos paramétricos y los modelos no paramétricos. Los primeros consideran factores físicos del propio amortiguador para poder expresar el comportamiento de este. Los modelos no paramétricos describen las características del amortiguador a través de ecuaciones matemáticas que no tienen una interpretación física.

4.2 MODELOS PARAMÉTRICOS

Los modelos paramétricos interpretan respuestas físicas con parámetros que se miden o regulan para poder interpretar el comportamiento del amortiguador MR. Para obtener los parámetros que influyen el comportamiento del fluido se realizan numerosos ensayos con el dispositivo.

Generalmente para el desarrollo de modelos paramétricos la señal de salida es la fuerza de amortiguación que varía en función a la corriente aplicada al amortiguador para producir el campo magnético.

Los modelos desarrollados a lo largo de los años para la predicción del comportamiento viscoelástico del amortiguador son múltiples. Los modelos paramétricos se dividen en dos familias; los modelos que se basan en ecuaciones diferenciales no lineales (el modelo de Bingham, modelo de Bouc–Wen, modelo de Bouc–Wen modificado, modelo de Dahl modificado y modelo de fricción de LuGre modificado) y los que se basan en modelos algebraicos (modelo de N.M. Kwok, modelo algebraico y el algébrico modificado) [15, 16].

A continuación, se detallan las características de cada uno de los modelos.

4.2.1 MODELOS DIFERENCIALES

Los modelos diferenciales se basan en ecuaciones diferenciales no lineales para la modelización del comportamiento de los amortiguadores MR. A continuación se describen los más comunes.

4.2.1.1 MODELO DE BINGHAM

El modelo de Bingham se utiliza para describir el comportamiento de fluidos MR y electrorreológicos (ER). En este modelo la viscosidad plástica se define como la pendiente de los datos de tensión de corte obtenidos en ensayos.

Para valores positivos de la tensión de corte, la tensión total viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \tau_{y(field)} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

donde $\tau_{y(field)}$ es el límite de fluencia inducido por el campo magnético, η es la viscosidad del fluido y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación.

El modelo de Bingham se basa en un elemento de fricción de Coulomb dispuesto en paralelo con un amortiguador viscoso, como se muestra en la figura 4.1. En este modelo \dot{x} representa la velocidad del pistón del amortiguador. La fuerza ejercida por el dispositivo se expresa de la siguiente manera:

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2)$$

donde c_0 es el coeficiente de amortiguación y f_c es la fuerza de fricción que está relacionada con la tensión de fluencia del fluido. f_0 representa la precarga del amortiguador para compensar la expresión cuando la velocidad del pistón del amortiguador es nula [16].

Un esquema del dispositivo de control del modelo de Bingham se muestra en la figura 4.1.

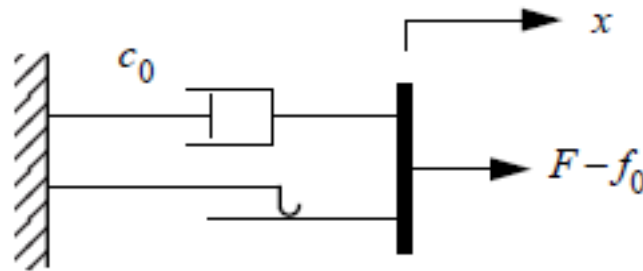


Figura 4. 1 Dispositivo de control de modelo de Bingham [16].

Los inconvenientes del modelo de Bingham se observan si se estudia la respuesta entre la fuerza y la velocidad, especialmente cuando esta es cercana a cero. Aunque este modelo puede ser el adecuado para el análisis de la respuesta del amortiguador MR, el modelo falla para una aplicación de control debido a incongruencias entre los resultados dados por el modelo y los datos obtenidos en los ensayos. Este modelo no predice adecuadamente el comportamiento del amortiguador MR cuando la velocidad del pistón es cero; en esta condición la fuerza adquiere un valor positivo con una aceleración negativa (i.e. desplazamiento positivo) y viceversa. En la figura 4.2 se muestran las predicciones del modelo de Bingham frente a los datos obtenidos en los ensayos [16].

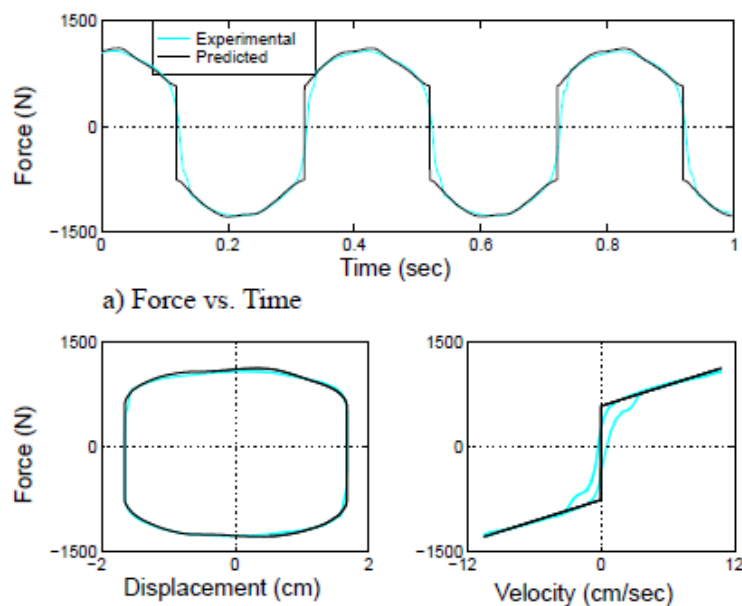


Figura 4. 2 Comparación entre el modelo de Bingham y los datos de ensayo [16]

4.2.1.2 MODELO DE BOUC-WEN

El modelo de Bouc-Wen trata de mejorar la exactitud del modelo de Bingham, para ello requiere un modelo más complejo que el visto en el apartado 4.2.1.1. El modelo de Bouc-Wen es un modelo muy versátil que ha sido utilizado para numerosos estudios de fuerza de histéresis [16].

4.2.1.2.1 MODELO DE BOUC-WEN SIMPLE

El modelo de Bouc Wen es el más común para la predicción del comportamiento de un amortiguador MR. La figura 4.2 muestra el esquema del modelo de Bouc Wen Simple.

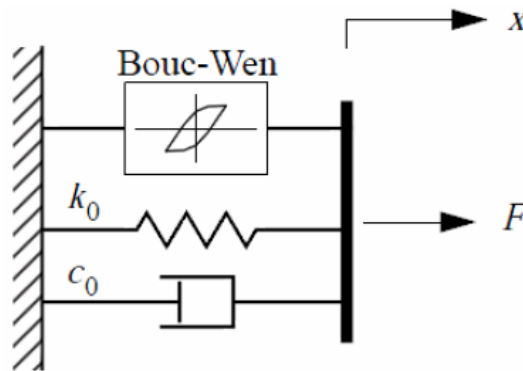


Figura 4. 3 Esquema del modelo de Bouc Wen simple [16]

Con este modelo la fuerza del amortiguador MR, que no es lineal, se estudia mediante la siguiente ecuación:

$$F = \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) \quad (3)$$

donde α representa un parámetro relacionado con la tensión de fluencia del material MR; k_0 es la rigidez del resorte, c_0 es el coeficiente de curva de amortiguación y z es la deformación producida por la histéresis en el modelo.

z se define en el modelo de Bouc Wen simple mediante la siguiente expresión:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta \dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (4)$$

donde A , β , y γ son parámetros propios del modelo de Bouc Wen.

Para poder conseguir un óptimo rendimiento de los sistemas de control, que son equipados al amortiguador MR, el voltaje aplicado debe cambiar con respecto a la fuerza ejercida por el amortiguador. Para asegurar que los coeficientes propios del modelo de Bouc Wen (α , β , c_0 y k_0) se adaptan al funcionamiento real del amortiguador, estos se definen con ecuaciones lineales en función del voltaje efectivo. Las ecuaciones de estos coeficientes son:

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (5)$$

$$c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (6)$$

$$k_0(u) = k_{0a} + k_{0b}u \quad (7)$$

Para ajustar los efectos dinámicos causados hasta que el fluido MR alcanza el equilibrio reológico, es necesario aplicar la siguiente ecuación para que actúe como filtro para obtener el voltaje efectivo, u [17]:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (8)$$

donde v es el voltaje aplicado para la generación de corriente.

4.2.1.2.2 MODELO DE BOUC-WEN MODIFICADO

El modelo de Bouc Wen explicado en el apartado 4.2.1.2.1 no completa en su previsión del comportamiento y cuenta con un error en el cálculo de la fuerza ejercida por el amortiguador MR.

Para conocer mejor la región de la curva Fuerza – Velocidad que no es lineal, es decir, la región en la cual la velocidad y aceleración tienen signos opuestos y la magnitud de la velocidad es significativamente más baja; Spencer et al. [16] en 1996 propone, una modificación al modelo de Bouc-Wen original [17], con el fin, de minimizar el error del modelo al comportamiento real del amortiguador MR. A día de hoy el Modelo Bouc-Wen Modificado es el más usado para las simulaciones del fluido MR en amortiguadores [15, 16, 17].

El modelo Modificado de Bouc Wen estima que la fuerza total generada por el amortiguador MR se calcula mediante el sistema descrito en la figura 4.4.

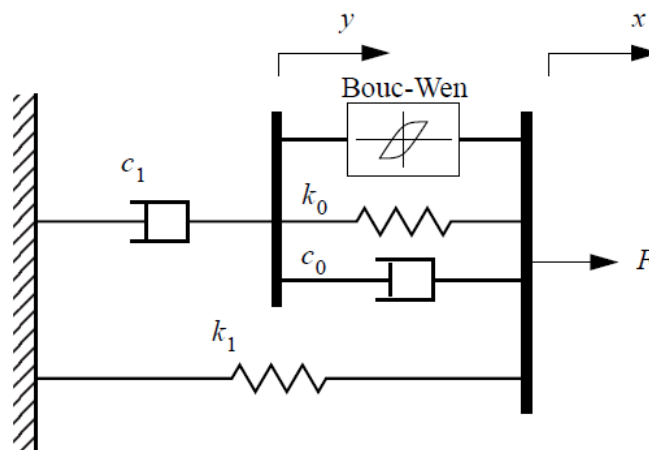


Figura 4. 4 Modelo Modificado de Bouc Wen [16]

Cada componente del sistema se define analíticamente de la siguiente forma:

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (9)$$

La fuerza puede simplificarse mediante la siguiente expresión:

$$F = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (10)$$

Para conocer el desplazamiento causado por la histéresis, z , se utiliza la siguiente expresión:

$$z = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (11)$$

El sentido analítico de y se explica con esta expresión:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y)] \quad (12)$$

Para determinar que el modelo es válido para campos magnéticos que pueden ser fluctuantes; los parámetros α , c_0 y c_1 se definen en función del voltaje efectivo de la corriente inducida al amortiguador MR, mediante las siguientes expresiones:

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (13)$$

$$c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (14)$$

$$c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad (15)$$

como, al igual que en el modelo de Bouc Wen Simple, es necesario el uso de un filtro para el voltaje efectivo y el cálculo de u se consigue siguiendo la ecuación 8.

El resto de coeficientes del modelo del Bouc Wen Modificado se deben ajustar para cada tipo de amortiguador MR.

4.2.1.3 MODELO DE N.M. KWOK

El modelo de N.M. Kwok cobra una significativa importancia en este Trabajo de Fin de Grado debido a que es este modelo el que se utiliza para modelar el comportamiento real ensayado en el laboratorio.

En 2006 N.M. Kwok publica un modelo más simple para simular la relación de la fuerza por histéresis con la velocidad del amortiguador MR [18]. El modelo propuesto diferencia tres componentes para la representación del amortiguador MR. Se discretizan: la rigidez del amortiguador, la histéresis y la viscosidad del fluido del interior del amortiguador. La figura 4.5 muestra la disposición conceptual del diseño de este modelo.

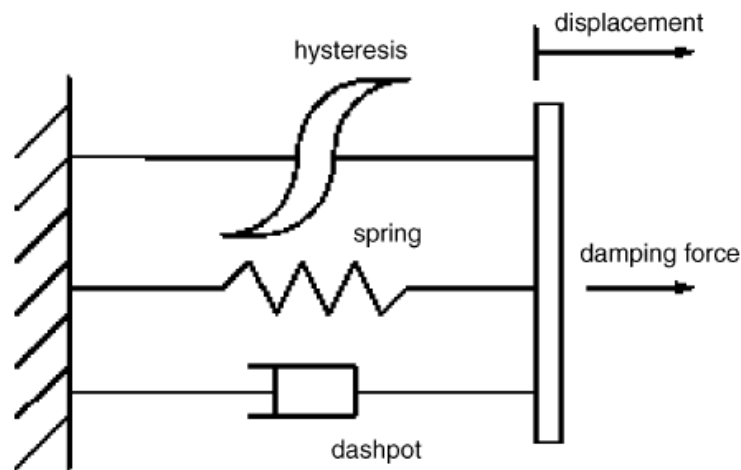


Figura 4. 5 Disposición conceptual del modelo de N.M. KWOK para amortiguadores MR [18].

Matemáticamente el modelo consta de dos ecuaciones, una de ellas determinada por una tangente hiperbólica para representar la histéresis y una ecuación lineal, que representan la viscosidad y la rigidez.

Las ecuaciones del modelo de N.M. Kwok son las siguientes:

$$f = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (16)$$

$$z = \tanh(\beta\dot{x} + \delta \text{sign}(x)) \quad (17)$$

donde f y f_0 representan la fuerza ejercida por el amortiguador, debido a la histéresis generada por el fluido MR; y la precarga del amortiguador MR en el punto de cálculo. Como se ha visto en las ecuaciones de los modelos de los apartados 4.2.1.1, y 4.2.1.2, la velocidad viene indicada por \dot{x} mientras que la posición se indica con x .

El resto de los parámetros de la ecuación son coeficientes asignados a fenómenos del comportamiento del amortiguador MR. Los coeficientes c y k representan la rigidez y la viscosidad, del amortiguador MR sin la aportación del fluido MR, respectivamente [18]. La expresión con la que se obtiene la variabilidad de la fuerza de histéresis viene aportado por z .

El resto de coeficientes son descritos por su efecto en la curva característica de la fuerza de histéresis con la velocidad de un amortiguador MR. El coeficiente β determina la inclinación de la curva producido por la histéresis cuando el amortiguador se aproxima a la posición de máximo desplazamiento. Este coeficiente es un factor de escala para la velocidad, de este modo un valor alto de β proporcionará una pendiente de la curva de histéresis elevada [10]. En la figura 4.6 se muestra el efecto del coeficiente β sobre la curva de la fuerza de histéresis y la velocidad.

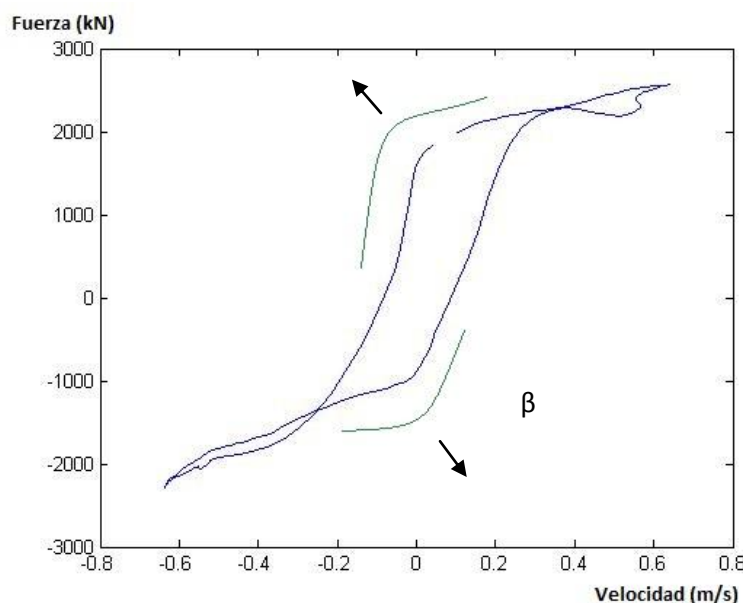


Figura 4. 6 Efecto de β sobre datos de ensayos de un amortiguador MR

El coeficiente δ es, como lo es β , otro coeficiente de escala. En este caso este coeficiente determina la anchura del tramo de máxima aceleración del movimiento del amortiguador MR. De este modo un valor alto de δ corresponde a una anchura de la histéresis alta [18]. En la figura 4.7 se muestra el efecto del coeficiente δ sobre la histéresis.

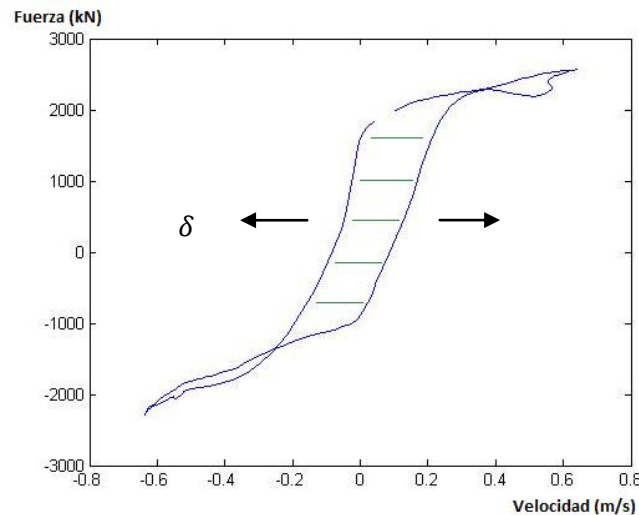


Figura 4. 7 Efecto de δ sobre datos de ensayo de un Amortiguador MR

La magnitud de la fuerza media del amortiguador MR se escala con el coeficiente α [18]. De tal modo, que un mayor valor α simula una mayor fuerza ejercida por el amortiguador MR. Los efectos del coeficiente α sobre la fuerza de histéresis se muestran en la figura 4.8.

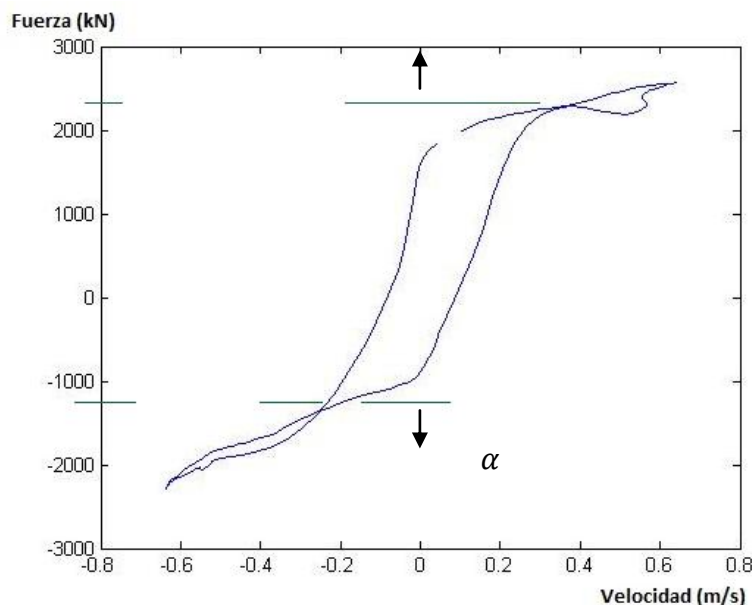


Figura 4. 8 Efecto de α sobre datos de ensayos de un amortiguador MR

Las aportaciones de los coeficientes c y k , ya explicados en este apartado, afectan también la disposición de la curva del modelo. El coeficiente c se asocia a la velocidad y representa la viscosidad del amortiguador MR. Gráficamente el coeficiente c da una escala de la pendiente de los dos extremos de la curva característica. [18]. Cuanto mayor sea el valor de c mayor será la pendiente generada. En la figura 4.9 se observa su efecto. La rigidez del amortiguador MR, representada por k , afecta a la histéresis en los puntos en los que la velocidad se encuentra en los extremos de su rango de valores. En la curva de histéresis se observa esto en los extremos de la curva. Un valor alto de k dará lugar a una apertura de la curva en los extremos, mientras que un valor negativo de k dará lugar a una apertura de los extremos de la curva de histéresis en sentido contrario. La figura 4.10 muestra el efecto de k sobre la curva.

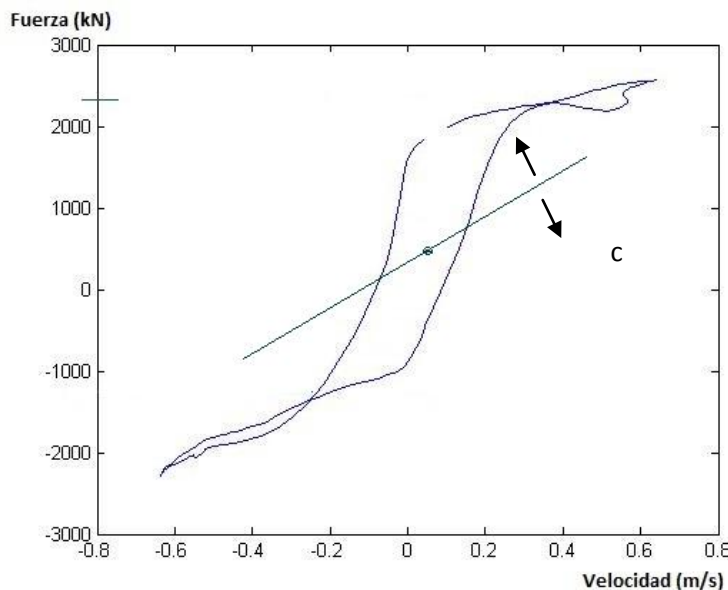


Figura 4. 9 Efecto de c sobre datos de ensayo de un amortiguador MR

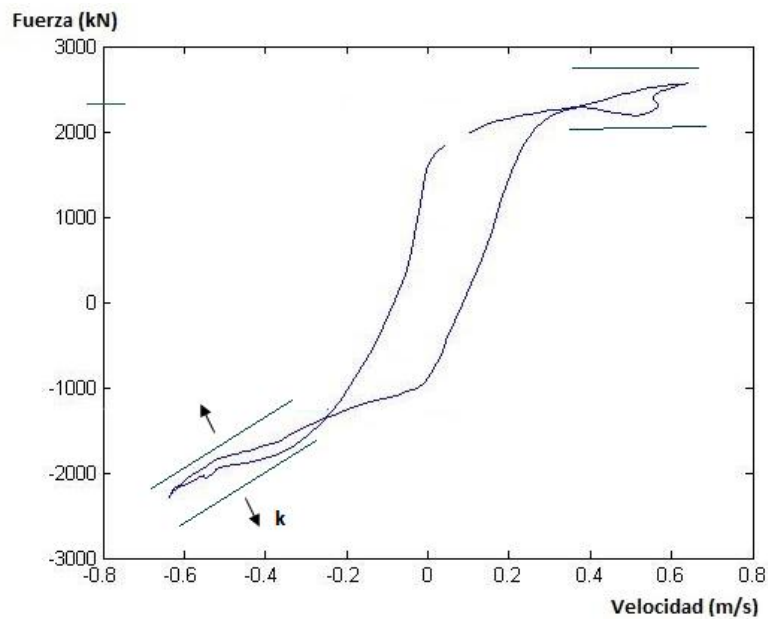


Figura 4. 10 Efecto de k sobre datos de un amortiguador MR

Los coeficientes de ajuste en el modelo de N.M. Kwok son obtenidos por métodos de optimización. En este Trabajo de Fin de Grado se tratará de obtener dichos coeficientes y ajustar la curva de comportamiento de un amortiguador MR real con el modelo de N. M. Kwok.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN ALGORITMOS GENÉTICOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos de optimización son una herramienta muy útil de aproximación a soluciones que mediante cálculo convencional son complejas. En el caso de la optimización de coeficientes para la modelización de los amortiguadores MR se utilizan métodos iterativos debido a que, por la naturaleza del fluido magneto reológico, se encuentran puntos del comportamiento no diferenciables. En este capítulo se estudiará el método de optimización que se utiliza en este Trabajo de Fin de Grado para obtener los coeficientes del modelo de N.M. Kwok, visto anteriormente.

5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que pueden ser usados para la resolución de problemas de búsqueda y de optimización [19]. Los algoritmos genéticos se inspiran en el proceso genético de los organismos vivos, apoyándose en las postulaciones de Darwin (1859) que indican que las poblaciones de seres vivos evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de selección natural y de la supervivencia del más fuerte. Para la evolución de valores óptimos en la resolución del problema con el algoritmo genético la buena codificación es un factor determinante.

En la naturaleza las poblaciones de seres compiten entre sí por la supervivencia, incluso entre seres de la misma población. Los individuos con más éxito a la supervivencia son proclives a generar mayor número de descendientes y viceversa. De esta forma los genes de las poblaciones mejor adaptadas dan lugar a una propagación de sus genes ascendente en función de las generaciones propagadas. La combinación de buenas generaciones puede dar lugar a una descendencia cuya adaptación al medio es mucho mayor que la de sus ancestros, produciendo lo que se denomina un “superindividuo”. Este es el método por el que las especies evolucionan y se logran cada vez individuos mejor adaptados.

Los algoritmos genéticos imitan análogamente el comportamiento de la naturaleza. Existe una población de individuos cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le atribuye un valor relacionado con el rango de posibles valores que se puedan obtener en la función que se quiera estudiar. El grado de adaptación a supervivencia de un valor viene dado por su acercamiento a la solución real del problema dado. Similarmente a la naturaleza, las probabilidades de reproducción del valor con mayor grado de adaptación a la supervivencia serán más altas. El cruce de individuos produce valores que reúnen propiedades de sus “padres”; cuanto más se distancie un valor de la solución menor es la oportunidad de que su herencia genética se propague a lo largo de sus generaciones, dando lugar así a que el grado de error de la población final con el resultado real de la función estudiada sea menor. Sin

embargo todo este proceso converge a una solución óptima del problema sólo si el algoritmo ha sido bien diseñado.

Los algoritmos genéticos no siempre garantizan que encuentren una solución óptima a un problema dado, sin embargo existe evidencia empírica que demuestra que las soluciones aportadas por el algoritmo son aceptables. El poder de este método es que es una técnica robusta y que pueden ser usados para un amplio registro de problemas provenientes de distintas áreas. Para problemas donde existan técnicas especializadas para su resolución es probable que éstas superen al algoritmo genético tanto en aproximación de la solución como en rapidez resolutoria. En cambio, la capacidad principal del algoritmo genético es que es aplicable para problemas donde no existen técnicas resolutorias específicas. Además en el caso de que existan pueden ser hibridadas con el algoritmo genético para optimizarlas.

5.2.1 CODIFICACIÓN

Para generar el algoritmo se toman a los individuos como conjunto de parámetros, los cuales se denominan genes, el conjunto de valores viene agrupado en una cadena de valores, que se denomina cromosoma. El conjunto de parámetros que representa a un cromosoma particular se llama fenotipo, este contiene toda la información necesaria para la construcción de un organismo, dicha información se denomina genotipo. Por tanto, la adaptación al problema de un individuo se hace evaluando el genotipo.

La función de adaptación ha de ser diseñada de forma particular; a cada cromosoma particular se le asigna un número real que refleja el nivel de adaptación al problema del individuo representado por el cromosoma.

Para la reproducción, fase reproductiva, se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y producir descendientes que constituyen la nueva generación de individuos. La selección de padres se efectúa usando un procedimiento por el que a cada individuo se le atribuye una probabilidad de reproducirse en función de a su grado de adaptación. El proceso de selección para la reproducción es conocido como la ruleta sesgada, el procedimiento

que se sigue es la reproducción de los individuos mejor adaptados varias veces por generación y el los menor adaptados sólo se escogen en contadas ocasiones para su reproducción.

Los operadores que utiliza el código para la creación de nuevas generaciones son habitualmente los dos siguientes:

- **OPERADOR DE CRUCE:** Su funcionamiento consiste en la selección de dos padres y el intercambio del conjunto de valores que forman el cromosoma de cada padre. La cadena de valores se separa en un punto al azar para los dos padres. La figura 5.1 muestra el proceso del operador de cruce.

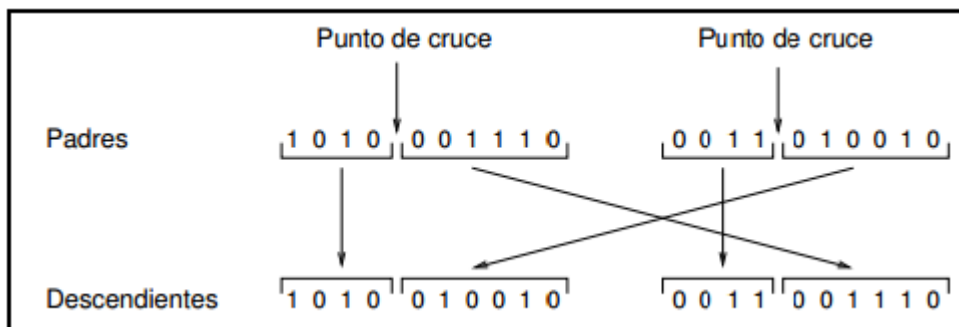


Figura 5. 1 Esquema del funcionamiento del operador de cruce [19]

- **OPERADOR DE MUTACIÓN:** A cada hijo se le aplica de manera individual una alteración aleatoria de cada gen (normalmente sucede con una baja probabilidad) de cada componente del cromosoma. El proceso del operador de mutación se puede ver reflejado en la figura 5.2.

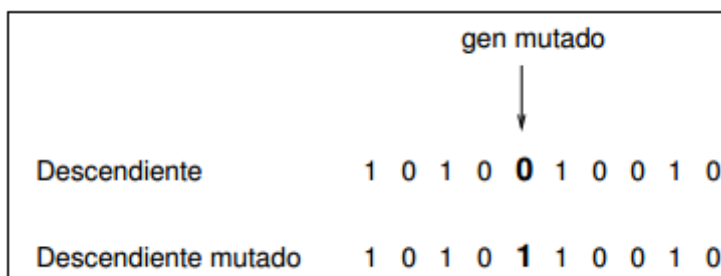


Figura 5. 2 Esquema del funcionamiento del operador de mutación [19]

El operador de cruce es más importante que el operador de mutación, debido a que éste asegura que ningún punto del espacio quede sin ser examinado y por tanto es determinante para asegurar la convergencia del algoritmo genético.

5.2.2 EXTENSIONES Y MODIFICACIONES AL ALGORITMO GENÉTICO

El algoritmo puede ser modificado para su adaptación a la resolución del problema de distintas maneras. La figura 5.3 expresa un pseudocódigo de un algoritmo genético abstracto.

```
BEGIN AGA  
  Obtener la poblacion inicial al azar.  
  WHILE NOT stop DO  
    BEGIN  
      Seleccionar padres de la poblacion.  
      Producir hijos a partir de los padres seleccionados.  
      Mutar los individuos hijos.  
      Extender la poblacion añadiendo los hijos.  
      Reducir la poblacion extendida.  
    END  
  END AGA
```

Figura 5.3 Códificación básica del algoritmo genético

Los conceptos mostrados en el código de la figura 5.3 serán explicados en los apartados 5.2.2.1, 5.2.2.2, 5.2.2.3, 5.2.2.4, 5.2.2.5, 5.2.2.6.

5.2.2.1 EXPLICACIÓN MATEMÁTICA

Como se ha explicado en el apartado 5.1, la aplicación de los algoritmos genéticos está enfocada a la optimización de funciones. En este apartado se explica cómo se ha hecho la adaptación del fenómeno de la naturaleza a conceptos matemáticos.

Dado un dominio D y una función $f: D \rightarrow R$. La optimización de la función f se trata en encontrar el mejor valor de la función para el dominio D . De este modo, el objetivo es hallar un $x \in D$, tal que, $f(x) \leq f(y)$ para una $y \in D$.

La tarea de optimización no exige un cómputo elevado, sin embargo, la tarea de optimización se acompleja debido a la existencia de mínimos locales en el dominio. De este modo, si existiesen los mínimos locales cumple la siguiente expresión:

$$\exists E(x), \text{ tal que si } y \in E(x), f(x) \leq f(y)$$

Para que el algoritmo genere un dominio, y por tanto un espacio de búsqueda, es necesaria la introducción de una función objetivo. Es necesario que dicha función sea inyectiva y de esta manera los elementos del dominio sean discernibles. Por tanto esta descripción se expresará de esta forma:

$$e : D \rightarrow S^l \text{ donde } l \leq \log_{|S|}|D|$$

Se realiza de este modo para representar los elementos del dominio como una cadena de valores de S . S es denominado como alfabeto, mientras que S^l constituye el espacio de búsqueda. La función objetivo queda dada por la siguiente expresión:

$$f(x) = g(e(x))$$

5.2.2.2 POBLACIÓN

El tamaño de la población es un condicionante para cubrir el dominio de valores total que pueda abarcar el problema concreto. Diseñando el algoritmo con una población pequeña se correría el riesgo de que no todos los puntos del espacio se cubriesen con todos los individuos de la población. Por el contrario si se establece una población de gran tamaño se puede asegurar con menor incertidumbre la totalidad del dominio pero se pueden acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional del trabajo con un número de individuos más altos.

5.2.2.3 FUNCIÓN OBJETIVO

Un aspecto crucial para el comportamiento del algoritmo genético es la determinación de una función objetivo o una función de adaptación. Idealmente con la construcción de funciones objetivo se puede obtener que cuando dos individuos se encuentren cercanos en el espacio sus valores en la función objetivo sean similares. La dificultad que se encuentra en el algoritmo genético se encuentra en la posibilidad de la existencia de un gran número de óptimos locales o el hecho de que el óptimo global se encuentre muy aislado en el espacio.

Para evitar que existan discrepancias la regla general que se utiliza es que cada individuo se refleje de una manera “real”. Sin embargo es posible que debido a restricciones de la optimización exista una fracción de la población se representen como puntos en el espacio no validos.

Con el fin de minimizar las posibilidades de no convergencia se pueden utilizar distintas estrategias. Una de las técnicas que se puede usar es la de penalización de la función objetivo, esta consiste en dividir el resultado de la función objetivo por una cantidad, denominada penalización, que guarda relación con el número de restricciones que el individuo viola. Si la computación de la función objetivo es muy compleja se puede utilizar otra

técnica que trata de aproximar la función objetivo, esto es debido a que en algunos casos la obtención de n funciones objetivo aproximadas puede resultar mejor que la evaluación exacta de una única función objetivo [19].

5.2.2.4 SELECCIÓN

Como se explica en el apartado 5.1, en los algoritmos genéticos la selección de individuos para su reproducción se hace en función de su adaptabilidad al medio. La forma más común para traducir el fenómeno de la naturaleza a un la optimización de este método es mediante el uso de una función de selección proporcional a la función objetivo [19]. De esta forma cada individuo tendrá una probabilidad de ser seleccionado proporcional a su aproximación en el espacio con la función objetivo.

Existe una posibilidad de error en la optimización causada por una rápida convergencia hacia un resultado. Esto es debido a la reproducción única de superindividuos desembocando en un óptimo local y no la solución del problema. Para evitar que esto suceda una de la técnicas usadas es la combinación de la aproximación del individuo con la función objetivo y el rango que tienen este individuo en función de su capacidad de adaptación.

Existen distintos métodos de selección de individuos como pueden ser los métodos de *selección elitista*, *selección por torneo* o *métodos de selección dinámicos*. Se encuentra más información sobre los distintos métodos de selección del algoritmo genético en la referencia [19].

5.2.2.5 CRUCE

La operación de cruce como se explica anteriormente recombina por medio de la selección de un punto de corte para intercambiar las secciones que se encuentran a la derecha de dicho punto [19].

Existen otros tipos de cruce teniendo en cuenta el uso de más de un punto de cruce, uno de ellos es el operador de cruce basado en dos puntos, ideado por De Jong (1975). Este método consiste en visualizar los elementos del individuo (cromosoma) como un circuito en el cual se efectúa una selección aleatoria de dos puntos, tal como se muestra en la figura 5.4.

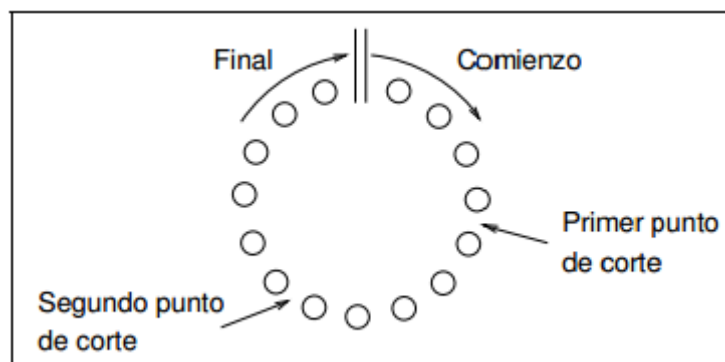


Figura 5. 4 Método de operador de cruce en dos puntos

Existen distintos tipos de operadores de cruce en los algoritmos genéticos, se puede encontrar más información sobre estos métodos en la referencia [19].

5.2.2.6 MUTACIÓN

La mutación es un operador básico, que proporciona un elemento de aleatoriedad en la proximidad de los individuos de la población. Mientras el operador de cruce es el encargado de realizar la búsqueda de en el espacio de dos posibles soluciones, según varios investigadores es el operador de mutación el que gana importancia según la población converge hacia una zona del espacio determinado [19].

Numerosas investigaciones concluyen que la búsqueda de un valor óptimo para su mutación tiene mayor importancia que el propio operador de cruce. Es Schaffer y col. (1989) [24] quien defienden una teoría llamada *evolución primitiva*. Esta establece que el proceso evolutivo se acelera hacia una solución óptima global basándose solo en la selección y la mutación [19].

Se pueden encontrar más investigaciones sobre la importancia del operador de mutación en los estudios de Ackley (1987) [23], Bramlette (1991) [21], Fogarty (1989) [20] y Michalewicz y Janikow (1991) [22].

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS

Una excitación sinusoidal de baja magnitud (± 16 mm) se aplica a través de un dinamómetro de choque hidráulico, del fabricante MicroTest (figura 6.1), a un amortiguador MR Magneride instalado en el dinamómetro previamente.



Figura 6. 1 El amortiguador MR colocado en el dinamómetro

Un único ciclo ininterrumpido, evitando los primeros ciclos donde existe una cantidad significativa de ruido por la aceleración inicial, fue tomado en todas las combinaciones de corrientes de 0–1.74 A (con un incremento de 0.2 A) y una frecuencia constante de 6 Hz. Para asegurar una distribución de la cadena de datos equilibrada, un mismo número de ciclos para todos los rangos de trabajo fueron tomados. La tabla 6.1 muestra un resumen de las condiciones de los ensayos realizados.

CORRIENTE (A)	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.73
FRECUENCIA (Hz)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
DESPLAZAMIENTO (mm)	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00

Tabla 6.1 Condiciones de los ensayos realizados

Los experimentos se realizan a temperatura ambiente de 20 °C, con una variación de ± 5 °C. El efecto de la temperatura, que se ha demostrado tener efectos sobre las propiedades del fluido MR [25], no se considera en este Trabajo de Fin de Grado.

En los ensayos se obtiene datos de fuerza, desplazamiento y del tiempo del instante de la medición. La velocidad es calculada posteriormente. A los datos de desplazamiento, velocidad y fuerza se les aplica un filtro para evitar ruido procedente de las mediciones.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS

Los datos experimentales obtenidos (apartado 6.1) son necesarios para poder ajustar el comportamiento del amortiguador MR. Para realizar esta tarea se utiliza el modelo de N. M. Kwok [18]; visto en el apartado 4.2.1.3 (ecuaciones 16 y 17).

Para identificar los parámetros necesarios, para poder simular el comportamiento del amortiguador, en cada ensayo se utilizan los algoritmos genéticos como método de optimización, capítulo 5. Para cada ensayo se establece una población de 1000 individuos y 400 generaciones. La función objetivo que se utiliza se muestra en la ecuación 16:

$$Func. Objetivo = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (FReal_i - FEstimada_i)^2}{n}} \quad (18)$$

donde $FReal_i$ representa la fuerza real tomada en el instante i de la medición, $FEstimada_i$ representa la fuerza estimada calculada en el instante i de la medición y n es el rango de toda la cadena de datos de fuerza real exportada del banco de ensayos.

La efectividad de la identificación de parámetros se evalúa en función de la forma final de la curva de histéresis dada por el modelo, la magnitud del error obtenido con la función objetivo y la eficiencia computacional del cálculo. Para realizar estas operaciones en este Trabajo de Fin de Grado se ha utilizado MATLAB como motor de cálculo.

6.3 AJUSTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Utilizando los parámetros que han sido identificados es posible la obtención de la curva característica, de cada ensayo realizado. En las figuras 6.2 a 6.11, se comparan los resultados de fuerza frente a la velocidad obtenidos experimentalmente (curva de color rojo) y estimados con el modelo de N. M. Kwok [18] (curva de color azul).

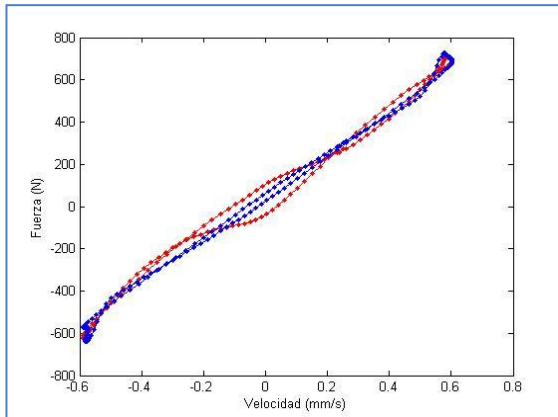


Figura 6.5 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0 A, 6 Hz, 16 mm

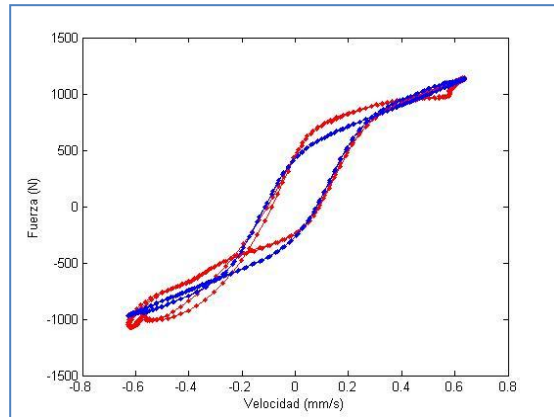


Figura 6.2 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.2 A, 6 Hz, 16 mm

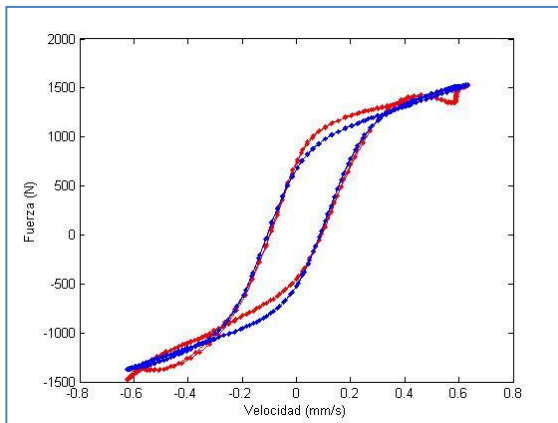


Figura 6.3 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.4 A, 6 Hz, 16 mm

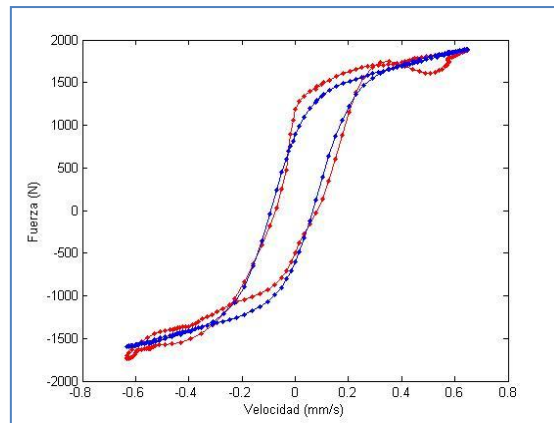


Figura 6.4 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.6 A, 6 Hz, 16 mm

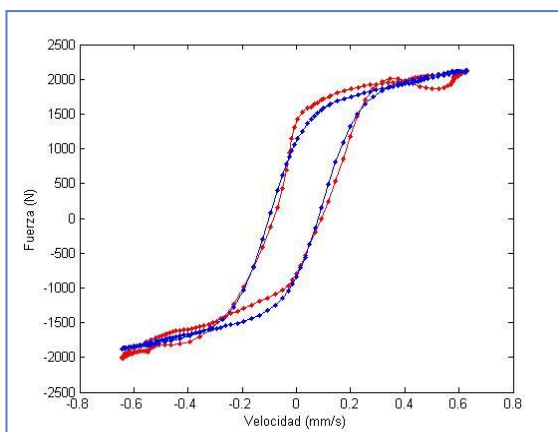


Figura 6.7 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.8 A, 6 Hz, 16 mm

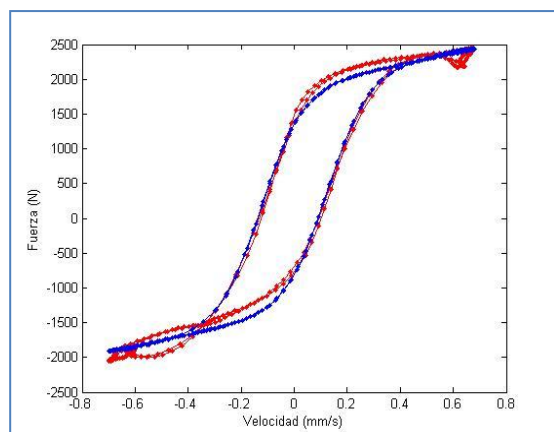


Figura 6.6 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1 A, 6 Hz, 16 mm

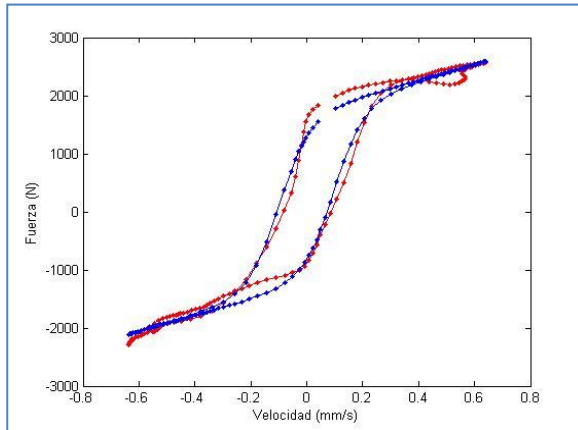


Figura 6.9 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.2 A, 6 Hz, 16 mm

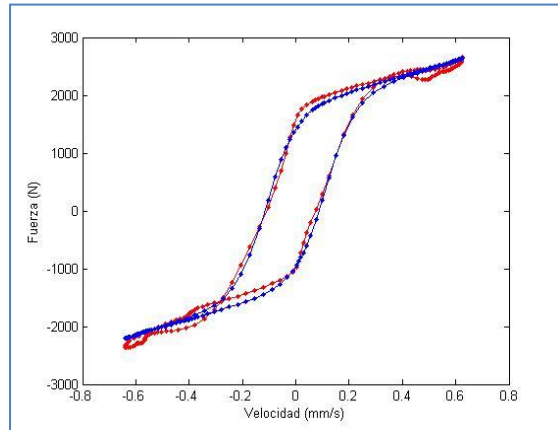


Figura 6.11 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.4 A, 6 Hz, 16 mm

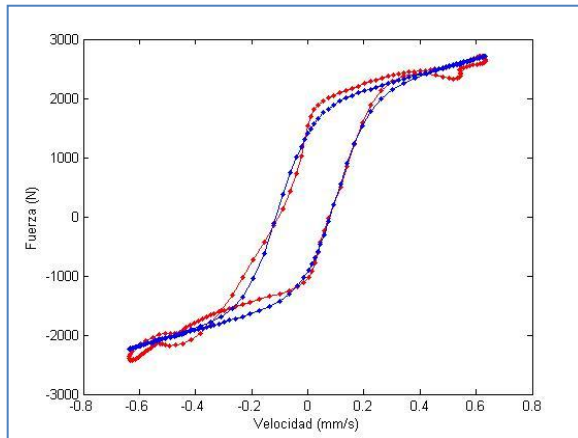


Figura 6.8 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.6 A, 6 Hz, 16 mm

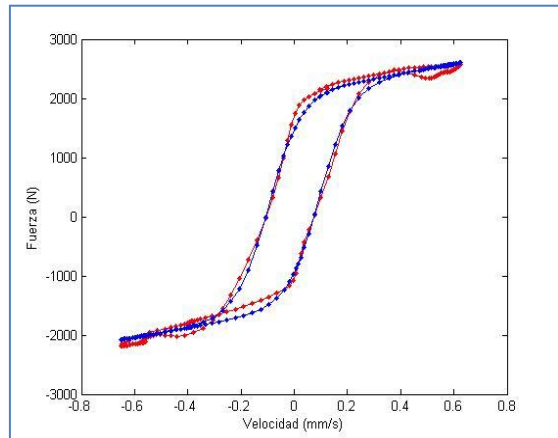


Figura 6.10 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.73 A, 6 Hz, 16 mm

La figura 6.5 muestra una curva con una reducida curva de histéresis, esto es debido a que al no introducir corriente al fluido MR el amortiguador genera una fuerza de histéresis dependiente principalmente por la rigidez inicial del amortiguador. En las figuras de 6.2 a 6.11 se muestra como se incrementa la fuerza de histéresis del amortiguador al inducir corriente al fluido MR.

La fuerza real muestra en las regiones de máxima velocidad que la aceleración y la velocidad tienen signos opuestos. Esto es debido a un error acumulado en la obtención de los resultados experimentales. Este fenómeno se reproduce en todos los resultados obtenidos.

La tabla 6.2 muestra los valores de los parámetros del ajuste con el modelo de N. M. Kwok [18], que han sido optimizados mediante algoritmos genéticos. Asimismo, se muestra el error calculado entre los datos de fuerza real y los datos de fuerza estimada.

Corriente (A)	β	δ	f_0	c	k	α	ERROR
0	32.49	-17.70	43.31	897.18	7.61	90.72	2.6064
0.2	7.93	1.03	79.02	900.95	-2.63	500.88	4.1831
0.4	7.39	0.85	77.30	899.94	-2.15	906.07	4.0409
0.6	8.00	0.70	141.50	758.00	-1.40	1267.70	8.5852
0.8	8.10	0.80	132.50	771.00	-2.00	1520.00	8.635
1	6.40	0.80	269.50	744.50	-2.20	1677.80	6.1814
1.2	9.20	0.90	239.40	1407.70	1.00	1448.50	10.8995
1.4	9.00	1.00	227.50	1389.30	0.80	1537.20	8.5944
1.6	8.60	0.90	242.60	1344.90	0.60	1616.80	10.2425
1.73	8.30	0.80	270.40	793.10	-0.50	1836.60	7.5649

Tabla 6. 2 Resultados de los coeficientes del modelo de N. M. Kwok y el error entre la fuerza real y la fuerza estimada

Para hacer un estudio de mayor profundidad sobre estos resultados, a continuación, se procede a estudiarlos valores de los coeficientes frente a la corriente inducida.

La figura 6.12 muestra los resultados del parámetro c . El coeficiente c da escala a la pendiente de la curva de fuerza de histéresis. Los resultados obtenidos no guardan una correlación fuerte entre ellos ya que la pendiente de la curva del modelo viene condicionada por el error de medición en la zona de máxima velocidad, que se explica anteriormente en este apartado (apartado 6.3).

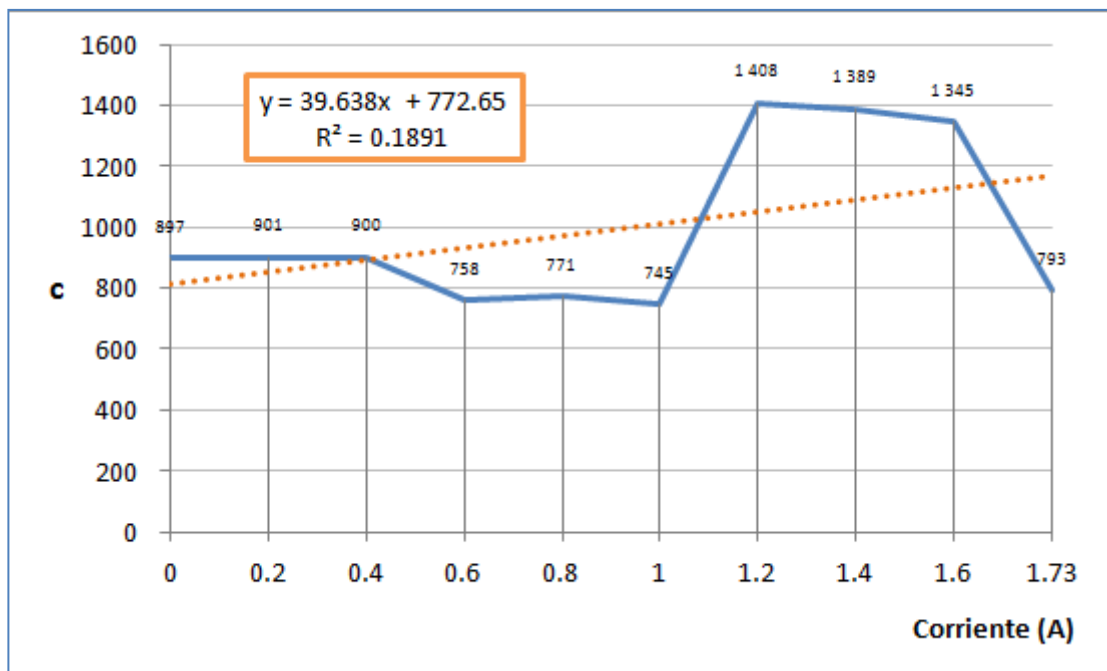


Figura 6. 12 Resultados de c. Donde "y" representa el coeficiente c y "x" la corriente inducida

La figura 6.13 Muestra los resultados del valor k. Este coeficiente ajusta la zona de la curva de fuerza en los puntos de máxima velocidad. Este coeficiente corrige la curva en su tramo final según sea el error de medición en la zona de máxima velocidad.

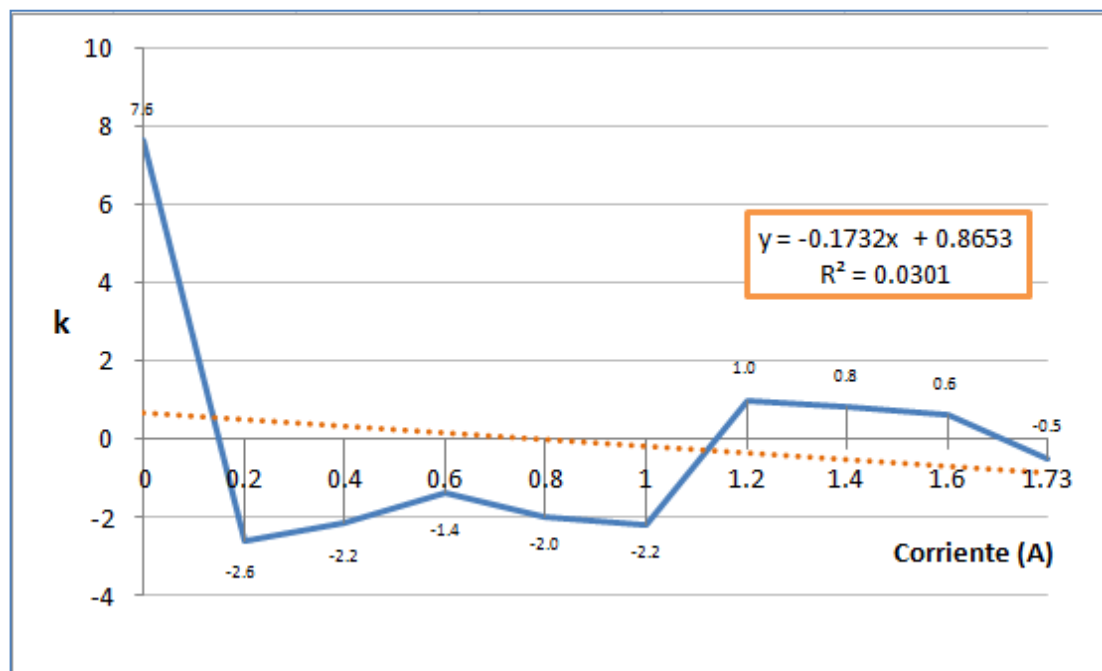


Figura 6. 13 Resultados de k. Donde "y" representa el coeficiente k y "x" la corriente inducida

El siguiente coeficiente analizado, figura 6.14, es α . Este coeficiente da escala a la altura que alcanza la curva de de fuerza. Los resultados de este coeficiente muestran que según incrementa la corriente inducida mayor es la fuerza ejercida por el amortiguador, por consiguiente, mayor es el valor del coeficiente α .

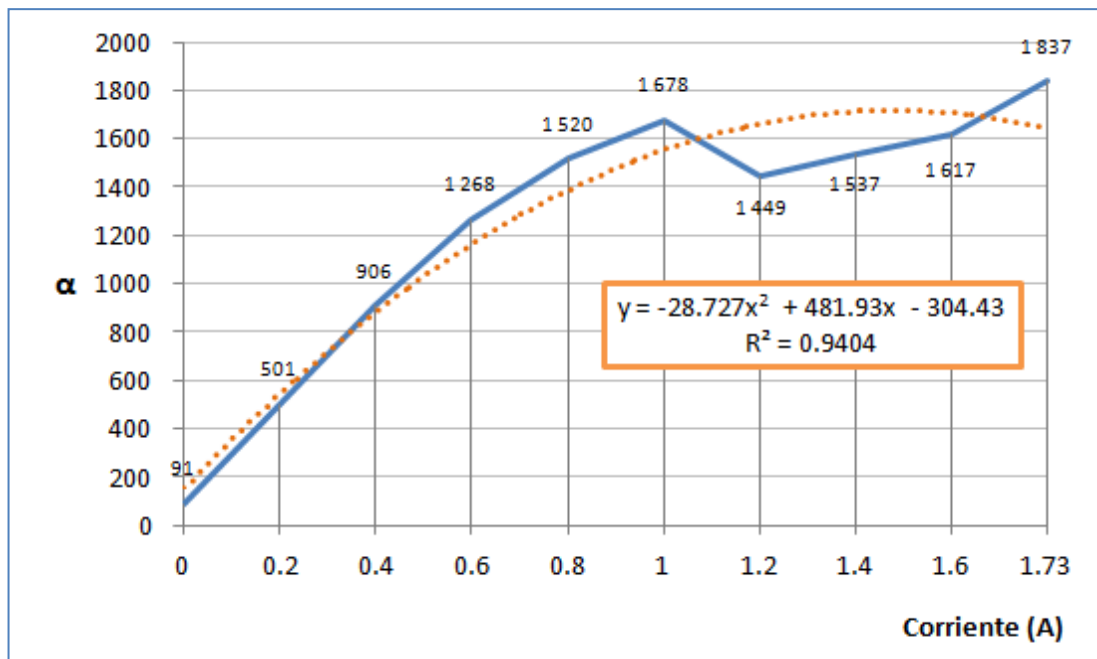


Figura 6. 14 Resultados de α . Donde "y" representa el coeficiente α y "x" la corriente inducida

Como se muestra en la figura 6.15 a partir de 0.2A el coeficiente β incrementa según aumenta la corriente. Este resultado cumple la relación que presenta el modelo ya que este coeficiente da escala al gradiente de velocidad del amortiguador MR y de este modo conforme se aumente la corriente el gradiente de velocidad incrementa [18].

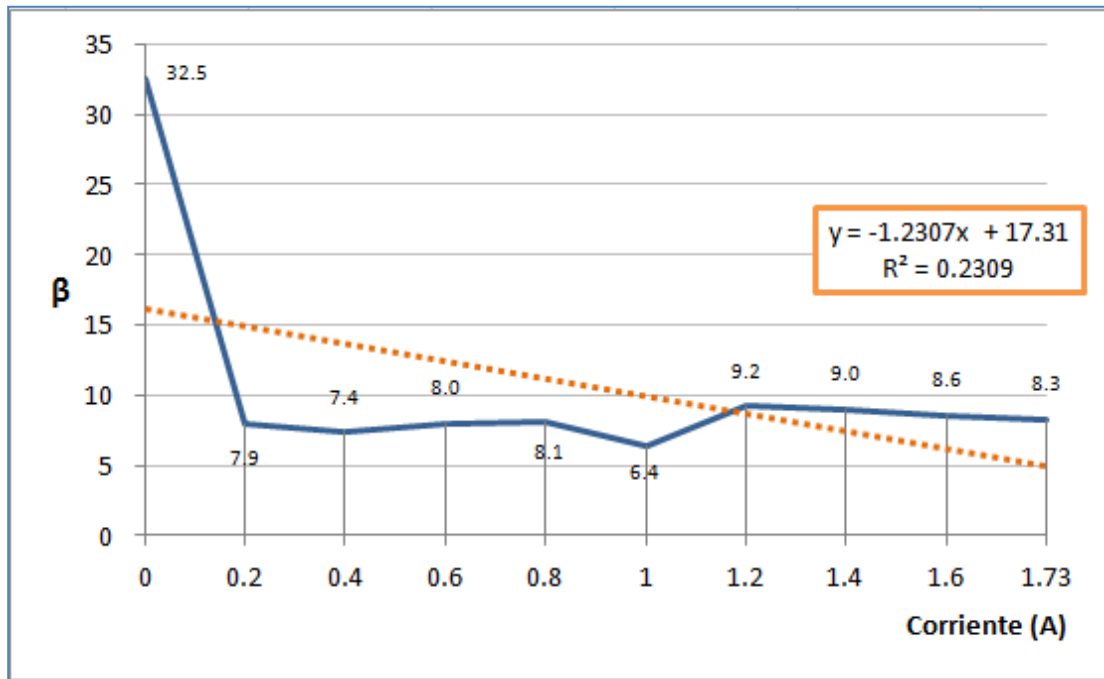


Figura 6. 15 Resultados de β . Donde "y" representa el coeficiente β y "x" la corriente inducida

La figura 6.16 muestra los resultados obtenidos para el coeficiente δ . En esta gráfica se muestra como el coeficiente tiene poca variación una vez se induce corriente y se obtienen valores cercanos a la unidad. Esto es debido a que el ancho de la histéresis se mantiene en el mismo rango de velocidades para todos los resultados con corriente inducida.

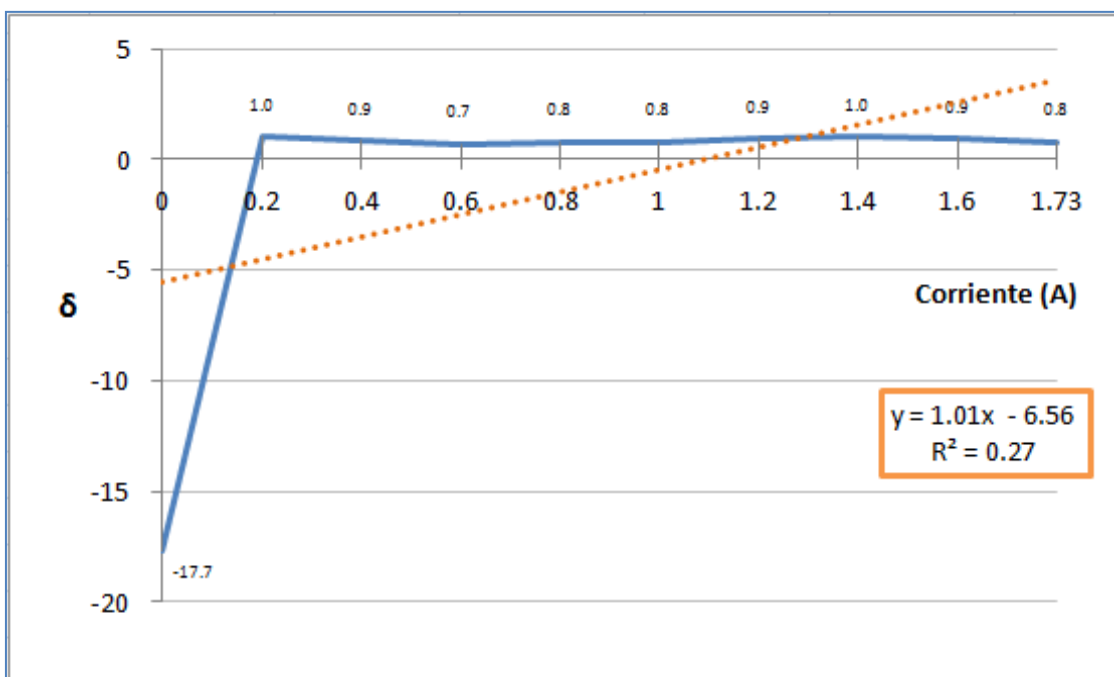


Figura 6. 16 Resultados de δ . Donde "y" representa el coeficiente δ y "x" la corriente inducida

El último coeficiente es f_0 , este muestra la fuerza inicial de precarga, es por esta razón por la que un análisis de la tendencia de este coeficiente no implica resultados similares a la hora de modelar un amortiguador determinado. En la figura 6.17 se muestran los resultados obtenidos en el banco de ensayos.

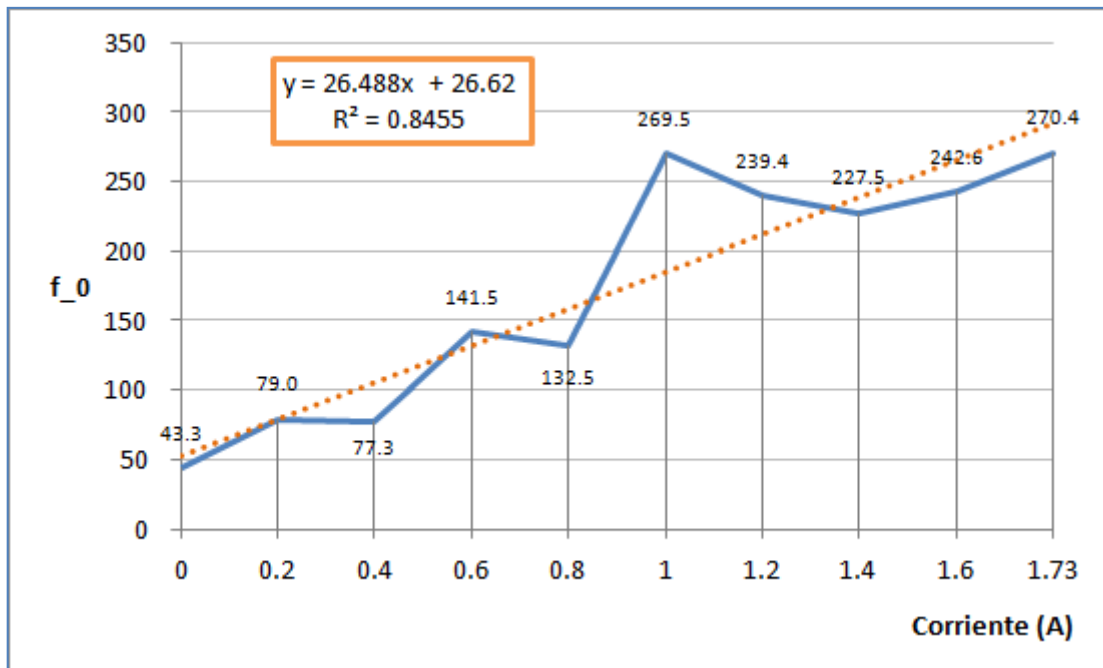


Figura 6. 17 Resultados de f_0 . Donde "y" representa el coeficiente f_0 y "x" la corriente inducida

En el Anexo I se muestran los resultados que obtiene N. M. Kwok [18] en su ajuste con datos experimentales.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

7.1 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas con los resultados del presente Trabajo de Fin de Grado, capítulo 6, son las siguientes:

- a) Validación del Modelo: Con los resultados que se observan en el capítulo 6 queda constatado que el modelo de N.M. Kwok sirve para modelar el comportamiento del amortiguador MR con las condiciones de ensayo tomadas. Esta conclusión se apoya en que el error máximo obtenido en los ensayos es un 0.5% de la fuerza ejercida por el amortiguador MR.

- b) Validación de los algoritmos genéticos: Con este trabajo de fin de grado se prueba que una óptima programación de los algoritmos genéticos para la búsqueda de coeficientes en ecuaciones no diferenciables es válido para un número de 6 variables.

- c) Contraste de resultados con y sin corriente inducida: Como se muestra el resultado de los coeficientes obtenidos con una corriente inducida 0 A son dispares al resto de coeficientes obtenidos cuando la corriente inducida es mayor de 0 A. Esto es un índice del efecto del fluido MR del interior del amortiguador cuando se somete a una corriente inducida.

- d) Relación de los coeficientes del modelo de N.M. Kwok: El resultado de los coeficientes es pronosticable una vez se induce corriente al amortiguador. Esto es importante debido a que el coste de cálculo computacional se ve ampliamente reducido con una buena definición del espacio de búsqueda del óptimo global.

- e) Importancia de la toma de datos reales: Los resultados experimentales obtenidos muestran que el comportamiento real del amortiguador MR sufre variaciones al comportamiento teórico. Esto es probado observando su curva de fuerza frente a la velocidad. Posibles errores acumulados en la medición, el filtrado de ruido y las condiciones externas no consideradas pueden ser la causa de dichas variaciones.

8.3 TRABAJOS FUTUROS

Como futuros trabajos se proponen:

- A) Estudiar el comportamiento del amortiguador MR, utilizando el modelo de N. M. Kwok [18], para distintas frecuencias de entrada.
- B) Estudiar la respuesta del amortiguador MR, utilizando el modelo de N. M. Kwok [18], para distintas amplitudes de entrada.
- C) Estudiar el comportamiento del amortiguador MR, utilizando el modelo N. M. Kwok [18], para distintas amplitudes de entrada.
- D) Estudiar el efecto de la temperatura en el comportamiento del amortiguador.

Bibliografía.

[1] – Mecánica del automóvil, disponible en:

<http://mecanicayautomocion.blogspot.com.es/2009/03/sistema-de-suspension.html>

[2] – PARLAK Zekeriya. Año 2011. “Investigation of the effects of temperature variations on the magnetorheological damper behavior”. 15th International Research/Expert Conference ”Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2011, Praga, Rep. Checa.

[3] – CHACÓN HERNANDO, Víctor. Año 2009. Proyecto fin de carrera: “Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos” Directora: Dra. Dña. Beatriz López Boada. Universidad Carlos III Madrid.

[4] – CÉSAR D. MESQUIDA, Jorge. Año 2011. “Introducción a los fluidos magnetoreológicos con aplicaciones en ingeniería” Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 16, N.º 1, pp. 27-36, 2012.

[5] – LÓPEZ GARCÍA, Óscar; CARNICERO LÓPEZ, Alberto; RUÍZ PABLOS, Rosa. Año 2004. “Materiales inteligentes (II): Aplicaciones tecnológicas” Instituto de Investigación Tecnológica ETSI-ICAI.

[6] – MATELLANES; Lina, CUEVAS, José María; CLEMENTE, Raquel; ALLUÉ, Sandra. Año 2003. “Materiales y estructuras inteligentes”. Centro Tecnológico Gaiker.

[7] – BARANWAL, Deepak; Dr. DESHMUKH, T.S. Año 2012. “MR-Fluid Technology and Its Application- A Review”. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 2, Issue 12.

[8] – CATAZARITE, David M; KENNETH, A. St. Clair; MARJORAM, Robert H. Año 2000. PATENTE US6070681 A. Lord Corporation.

- [9] – JOLLY, Mark R; BENDER, Jonathan W; CARLSON David J. Año 1999. “Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids”. Journal of Intelligent Material Systems and Structures.
- [10] – NGUYEN, Quoc-Hung; CHOI, Seung-Bok. Año 2012. “Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms”. Inha University, Korea.
- [11] – KIKUCHI LAB. Department of Mechatronics. Oita University. Disponible en: http://www2.hwe.oita-u.ac.jp/kikuchilab/Research/Research_eng.html
- [12] – <http://www.aficionadosalamecanica.net/>
- [13] – Magnetic Damper – Disponible en <http://www.formula1-dictionary.net/>
- [14] – SAPINSKI, Bogdan; FILUS, Jacek. Año 2003. “Analysis of Parametric of MR Linear Damper”. Journal of Theoretical And Applied Mechanics 41, 2, pp 215–240. Varsovia, Polonia.
- [15] – MENÉNDEZ PAMPLONA, Paloma. Año 2014. Trabajo Fin de Grado “Modelo inverso de un amortiguador magneto-reológico utilizando redes neuronales”. Tutora: María Jesús López Boada. Universidad Carlos III Madrid.
- [16] – SPENCER, B.F; DYKE, S.J; SAIN M.K; CARLSON J.D. Año 1996. “Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper”. ASCE Journal of Engineering Mechanics”.
- [17] – TALATAHARI, S.; KAVEH, A.; MOHAJER-RAHBARI. Año 2012. “Parameter identification of Bouc-Wen model for MR fluid dampers using adaptive charged system search optimization”. SPRINGER Journal of Mechanical Science and Technology.
- [18] – KWOK, N.M.; HA Q.P.; NGUYEN, J. LI, SAMALI, B. Año 2006. “A novel hysteric model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization”. University of Technology of Sydney. Sidney, Australia.
- [19] – ALGORITMOS GENÉTICOS. Departamento de Materiales Compuestos, Escuela politécnica del País Vasco. Disponible en <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>

- [20] – T.C. Fogarty. Año 1989. “Varying the probability of mutation in the genetic algorithm”. Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, 104–109.
- [21] – M.F. Bramlette. Año 1991. “Initialization, mutation and selection methods in genetic algorithms for function optimization”. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, 100–107.
- [22] – Z. Michalewicz, C.Z. Janikow. Año 1991. “Handling constraints in genetic algorithms”. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, 151–157.
- [23] – D.H. Ackley. Año 1987. “A Connectionist Machine for Genetic Hillclimbing”, Kluwer Academic Publishers.
- [24] – J.D. Schaffer, R.A. Caruna, L.J. Eshelman, R. Das. Año 1989. “A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization”. J.D. Schaffer (ed.). Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms. 51–60.
- [25] – S. S. Jumani. Año 2010 “An invertible open-loop nonlinear dynamic temperature dependent mr damper model”.

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Esquema de una suspensión pasiva en la rueda de un automóvil [12]	11
Figura 2. 2 Esquema de una suspensión activa en la rueda de un automóvil [12]	12
Figura 2. 3 Esquema de un sistema de suspensión semiactiva [12]	13
Figura 3. 1 Proceso de respuesta de Materiales Activos [5]	16
Figura 3. 2 Estructuras formadas en Fluido MR	18
Figura 3. 3 Relación Esfuerzo viscoso ante intensidad de Campo Magnéticos	19
Figura 3. 4 Esquema flujo MR controlado por una válvula [7]	20
Figura 3. 5 Esquema del sistema de amortiguación MR de un asiento de vehículo pesado [8]	21
Figura 3. 6 Esquema de un amortiguador MR [7]	21
Figura 3. 7 Amortiguador para control vibraciones de seísmos [9]	22
Figura 3. 8 Esquema funcionamiento de un amortiguador MR [12]	23
Figura 3. 9 Estructura de una válvula de un amortiguador MR [13]	24
Figura 3. 10 Fluido MR bajo disposición de cizalladura [10]	25
Figura 3. 11 Esquema de funcionamiento de un Freno MR [11]	26
Figura 3. 12 Prótesis inteligente para orthosis en el talón [11]	26
Figura 3. 13 Distribución de fluido MR a modo de compresión [9]	27
Figura 4. 1 Dispositivo de control de modelo de Bingham [16]	31
Figura 4. 2 Comparación entre el modelo de Bingham y los datos de ensayo [16]	31
Figura 4. 3 Esquema del modelo de Bouc Wen simple [16]	32
Figura 4. 4 Modelo Modificado de Bouc Wen [16]	34
Figura 4. 5 Disposición conceptual del modelo de N.M. KWOK para amortiguadores MR [18].	36
Figura 4. 6 Efecto de β sobre datos de ensayos de un amortiguador MR..	37
Figura 4. 7 Efecto de δ sobre datos de ensayo de un Amortiguador MR	38

Figura 4. 8 Efecto de α sobre datos de ensayos de un amortiguador MR..	38
Figura 4. 9 Efecto de c sobre datos de ensayo de un amortiguador MR ...	39
Figura 4. 10 Efecto de k sobre datos de un amortiguador MR.....	40
Figura 5. 1 Esquema del funcionamiento del operador de cruce [19]	44
Figura 5. 2 Esquema del funcionamiento del operador de mutación [19]	44
Figura 5. 3 Códificación básica del algoritmo gnético.....	45
Figura 5. 4 Método de operador de cruce en dos puntos	49
Figura 6. 1 El amortiguador MR colocado en el dinamómetro	51
Figura 6. 2 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.2 A, 6 Hz, 16 mm.....	54
Figura 6. 3 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.4 A, 6 Hz, 16 mm.....	54
Figura 6. 4 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.6 A, 6 Hz, 16 mm.....	54
Figura 6. 5 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0 A, 6 Hz, 16 mm	54
Figura 6. 6 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1 A, 6 Hz, 16 mm	54
Figura 6. 7 Curvas de comportamiento del amortiguador para 0.8 A, 6 Hz, 16 mm.....	54
Figura 6. 8 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.6 A, 6 Hz, 16 mm.....	55
Figura 6. 9 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.2 A, 6 Hz, 16 mm.....	55
Figura 6. 10 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.73 A, 6 Hz, 16 mm.....	55
Figura 6. 11 Curvas de comportamiento del amortiguador para 1.4 A, 6 Hz, 16 mm.....	55
Figura 6. 12 Resultados de c . Donde " y " representa el coeficiente c y " x " la corriente inducida.....	57
Figura 6. 13 Resultados de k . Donde " y " representa el coeficiente k y " x " la corriente inducida.....	57

Figura 6. 14 Resultados de α . Donde "y" representa el coeficiente α y "x" la corriente inducida	58
Figura 6. 15 Resultados de β . Donde "y" representa el coeficiente β y "x" la corriente inducida	59
Figura 6. 16 Resultados de δ . Donde "y" representa el coeficiente δ y "x" la corriente inducida	59
Figura 6. 17 Resultados de f_0 . Donde "y" representa el coeficiente f_0 y "x" la corriente inducida	60

Figura A. 1 Curvas de Fuerza frente a velocidad. Fuerza estimada (Azul, línea continua) y Fuerza real (Azul celeste, línea discontinua) [18].	
(a) frecuencia = 1 Hz, desplazamiento = 8 mm y (b) frecuencia = 2 Hz, desplazamiento = 4 mm.	72
Figura A. 2 Identificación de resultados de coeficientes (línea continua) y línea de tendencia (línea discontinua) de N. M. Kwok [19]: (a) Coeficiente c, (b) coeficiente k, (c) coeficiente α , (d) coeficiente β , (e) coeficiente δ , (d) coeficiente f_0	73

Índice de tablas

Tabla 3. 1 Tipología de materiales activos [6].....	17
Tabla 6. 1 Condiciones de los ensayos realizados	52
Tabla 6. 2 Resultados de los coeficientes del modelo de N. M. Kwok y el error entre la fuerza real y la fuerza estimada.....	56
Tabla A. 1 Condiciones de ensayos de N. M. Kwok [19]	71

ANEXO I

RESULTADOS DE N. M. KWOK

El objetivo de este anexo es mostrar los resultados que obtiene N. M. Kwok [18] ajustando su modelo a datos experimentales. Con este anexo se puede comparar los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Fin de Grado con los que obtiene N. M. Kwok [18].

A.1 IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS DE N. M. KWOK

En su toma de datos N. M. Kwok realiza ensayos para las siguientes combinaciones de amplitud, frecuencia y corriente de entrada, tabla A.1.

Corriente (A)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00
Frecuencia (Hz)	1	1	1	1	1	1
Amplitud (mm)	4	8	12	4	6	8

Tabla A. 1 Condiciones de ensayos de N. M. Kwok [18]

A.2 AJUSTE DE LA CURVA DE HISTÉRESIS

Con las condiciones vistas en el apartado A.1, N. M. Kwok [18] simula el comportamiento del amortiguador MR, figura A.1.

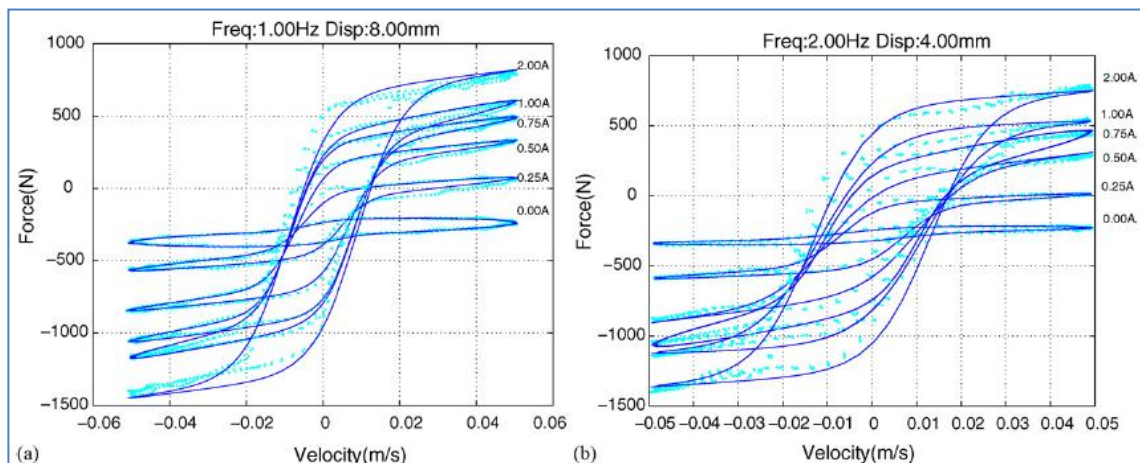


Figura A. 1 Curvas de Fuerza frente a velocidad. Fuerza estimada (Azul, línea continua) y Fuerza real (Azul celeste, línea discontinua) [18].

(a) frecuencia = 1 Hz, desplazamiento = 8 mm y (b) frecuencia = 2 Hz, desplazamiento = 4 mm.

El resultado de los valores de los coeficientes en el ajuste se muestran en la figura A.2.

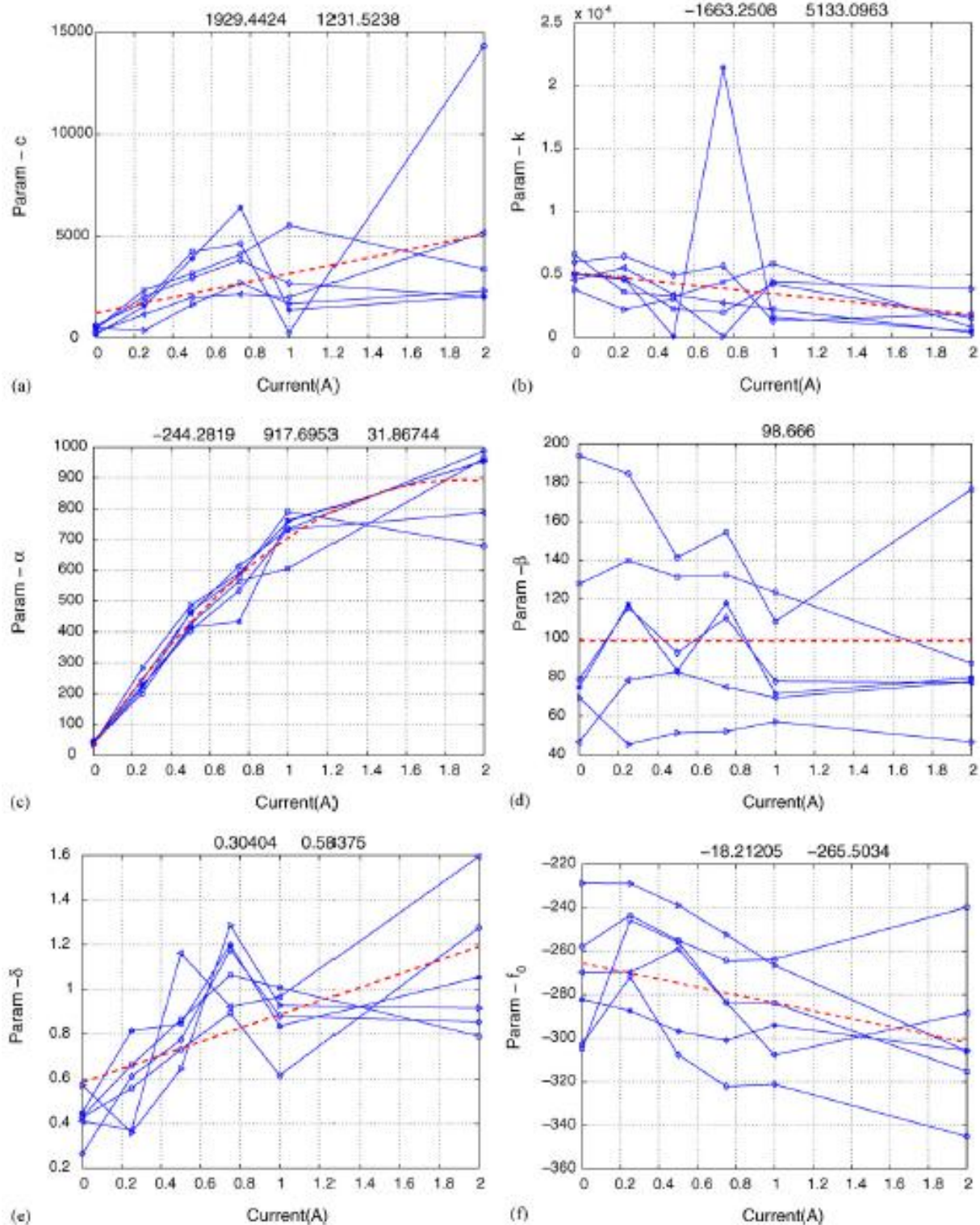


Figura A. 2 Identificación de resultados de coeficientes (línea continua) y línea de tendencia (línea discontinua) de N. M. Kwok [18]: (a) Coeficiente c , (b) coeficiente k , (c) coeficiente α , (d) coeficiente β , (e) coeficiente δ , (f) coeficiente f_0 .

Las siguientes expresiones de las líneas de tendencia de la figura A.2 se muestran a continuación [18]. Siendo i la corriente de entrada en todas las gráficas:

$$c = 1929i + 1232 \quad (19)$$

$$k = -1700i + 5100 \quad (20)$$

$$\alpha = -244i^2 + 918i + 32 \quad (21)$$

$$\beta = 100 \quad (22)$$

$$\delta = 0.30i + 0.58 \quad (23)$$

$$f_0 = -18i - 257 \quad (24)$$